Über den Einfluß von Belastungsschwankungen auf die elastischen Deformationen einiger Metalle.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von

Gerhard Hübers

aus Emsbüren.

Frankfurt a. M.
Buchdruckerei C. Kobisch.
1909.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551526_0132

Über den Einfluß von Belastungsschwankungen auf die elastischen Deformationen einiger Metalle.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von

Gerhard Hübers

aus Emsbüren.

ACAD
LUGD.BAT
BIBL

Frankfurt a. M.
Buchdruckerei C. Kobisch.
1909.

Referent: Professor Heydweiller.

Meiner lieben Mutter
und dem Andenken meines Vaters.

Inhalt.

Einleitung.

I. Abschnitt.

Dehnungsversuche.

a) Versuchsanordnung.

b) Versuchsergebnisse.

1. Teil: Kupferdraht.

2. Teil: Eisenbindedraht.

3. Teil: Stahldraht.

4. Teil: Aluminiumdraht.

II. Abschnitt.

Biegungsversuche.

III. Abschnitt.

Wiederholte Durchbiegung eines Stabes nach entgegengesetzten Seiten.

Ergebnis.

Einleitung.

Im Jahre 1835 veröffentlichte Wilhelm Weber in den Abhandlungen der Göttinger Societät eine Untersuchung, welche auf die Natur der elastischen Körper ein ganz neues Licht warf. Er machte darauf aufmerksam, daß durch Ausdehnung, Biegung und Torsion auch temporäre Veränderungen hervorgebracht werden, während man bis dahin nur die bleibenden Gestaltsveränderungen beachtet hatte.

Die Untersuchungen Webers, der in der erwähnten Abhandlung bereits ein Gesetz für die longitudinalen Dehnungen in einem Coconfaden aufstellte, wurden von F. Kohlrausch weitergeführt. Dieser machte auch bereits[1]) auf den Einfluß von Erschütterungen aufmerksam. „Es ist nun aber sehr leicht denkbar, daß die Nachwirkung von äußeren Einflüssen, welche oft am Spiegel bemerkt werden konnten, z. B. den kleinen Erschütterungen durch vorbeifahrende Wagen afficiert wird, und zwar in dem beobachteten Sinne, daß nämlich die Annäherung der Moleküle an die Gleichgewichtslage dadurch beschleunigt wird. Es liegt ja auch ein anderes ähnliches Faktum in der Physik vor, welches durch diese Hypothese erklärt wird, ich meine den Umstand, daß die Magnetisierung des Eisens unter dem Einflusse von magnetischen Kräften, z. B. des Erdmagnetismus, durch Erschütterung beschleunigt wird, welches Faktum eben mit zum Beweise vom Dasein molekularer drehbarer Magnete benutzt wird. Es heißt dies doch nichts anderes als: Die Erschütterung befördert die Drehung der Moleküle in die ihnen durch die äußeren Kräfte angewiesene Ruhelage."

Nach dieser Zeit wurde eine größere Reihe von Untersuchungen über die elastische Nachwirkung angestellt. G. Wiedemann[2]), der sich sehr eingehend mit dem Gegenstand beschäftigte, schrieb: „Ich habe nun u. A. gezeigt, daß die temporäre Torsion (resp. Biegung) eines Körpers ebensowohl durch kleine Erschütterungen, wie durch die Magnetisierung, d. h. durch die Bewegung der Moleküle in wesentlich anderen Bahnen, wie bei der ersten Deformation, ebenso auch durch Temperaturänderungen vermehrt, die permanente Torsion (resp. Biegung) vermindert wird, und in gleicher Weise die ersten kleinen Gestaltsveränderungen, Erschütterungen und Erwärmungen auf den temporären und permanenten Magnetismus wirken."

[1]) Pogg. Ann. 119, p. 357, 1863.
[2]) Wied. Ann. 6, 506, 1879.

G. Weidmann[1]), dessen Beobachtungen über den Einfluß von Erschütterungen auf die elastische Nachwirkung sich fast vollkommen mit den Ergebnissen G. Wiedemanns decken, stellte die Gesetze auf: „Die elastische Nachwirkung bei Biegung wird durch Erschütterungen, resp. Erwärmungen vermindert". „Wird der Stab erschüttert, während er unter dem Einflusse des biegenden Gewichtes steht, so nimmt seine elastische Nachwirkung zu."

Außer den genannten Forschern bearbeiteten noch viele andere das Problem der elastischen Nachwirkung. Alle Untersuchungen haben das Gemeinsame, daß sie den Einfluß der Erschütterungen nur nebenbei beobachten, indem diese meist als störende Einflüsse auftreten. Nur M. Cantone[2]) untersuchte den Einfluß von absichtlichen Erschütterungen durch einige wenige Belastungsschwankungen auf die Nachwirkung und findet, daß sie eine Verminderung der Hysteresis bewirken. Erwähnt soll noch werden eine neuere Veröffentlichung von S. Berliner[3]) „Ueber das Verhalten des Gußeisens bei langsamen Belastungswechseln." Diese Untersuchungen führten zu einer Hysteresiskurve.

Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß periodischer Belastungsschwankungen auf die elastischen Deformationen wurden bisher nicht veröffentlicht und doch ist die Kenntnis des Einflusses gerade der periodischen Belastungsschwankungen für die Praxis von großer Bedeutung, indem solche periodischen Belastungsschwankungen beispielsweise in jeder Brücke beim Befahren derselben, in jedem Lastkran, in jeder Transmissionswelle, überhaupt in jedem bewegten Maschinenteil auftreten. Es ist eine dem Ingenieur bekannte Erscheinung, daß Transmissionswellen mit der Zeit glashart werden und brechen, was auf die fortwährenden kleinen Belastungsschwankungen zurückzuführen ist.

Während, wie schon bemerkt, experimentelle Untersuchungen über den Einfluß periodischer Belastungsschwankungen auf die elastischen Deformationen nicht vorliegen, veröffentlichte im Jahre 1899 P. Duhem in der Zeitschrift für phys. Chemie, 28 Band, 4. Heft unter dem Titel „Die dauernden Aenderungen und die Thermodynamik" eine Elasticitätstheorie, die unter spezieller Berücksichtigung des Einflusses periodischer Belastungsschwankungen zu neuen Ergebnissen führte. Um diese Ergebnisse auf ihre Richtigkeit nachzuprüfen, wurden die im Folgenden mitgeteilten Untersuchungen auf Veranlassung von Prof. Heydweiller vorgenommen.

Das Resultat der Duhem'schen Elasticitätstheorie besteht im Folgendem:

Ist l die lineare Dilatation eines aufgehängten Drahtes und p die Spannung pro Einheit des ursprünglichen Querschnitts, so lassen sich die Zustände des Drahtes durch die Punkte einer Ebene darstellen, in welcher l und p als rechtwinklige Koordinaten

---

[1]) Wied. Ann. 29, 214, 1886.
[2]) Rendionti Lincei 3, 26, 1897.
[3]) Ann. d. Physik, 20, 1906.

genommen sind. Der dabei in Betracht kommende Teil der Ebene, in welchem l und p beide positiv sind, wird dann durch zwei Kurven, OJN und $J\gamma$ (Fig. 1) sowie durch eine Strecke HJ in vier Teile 1, 2, 3, 4 zerlegt. OJN nennt Herr Duhem die natürliche Zustandslinie, weil wie sogleich gezeigt werden wird, die Punkte von OJ dem stabilen Gleichgewichtszustand entsprechen. Wenn nämlich p fortwährend zwischen zwei von einander wenig verschiedenen Werten schwankt, so beschreibt der den Zustand des Drahtes darstellende Punkt X eine Zickzacklinie und bewegt sich dabei, wenn er sich in 1 oder in 2 befindet, auf einen Punkt von OJ zu, um den er schließlich einen Kreisprozeß beschreibt; diese Erscheinung ist realisiert in der elastischen Nachwirkung nach geschehener Belastung (Raum 1) und nach auf eine längere Belastung folgender Entlastung (Raum 2). Liegt dagegen Punkt X in 3, so bewegt er sich auf $J\gamma$ zu mit immer kleiner werdender Geschwindigkeit, um dann, sobald $J\gamma$ erreicht ist, seinen Weg in 4 mit stark wachsender Geschwindigkeit bis zum erfolgenden Bruch fortzusetzen.

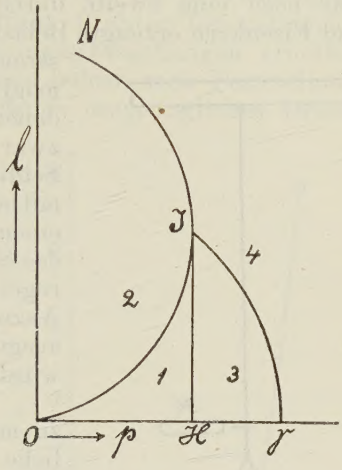

Fig. 1.

Dies gilt nach Herrn Duhem für alle elastischen Einwirkungen, bei denen der Zustand durch eine Variable bestimmt ist.

I. Abschnitt.

I. Teil.

Dehnungsversuche.

a) Versuchsanordnung.

Die Versuche wurden zunächst nach der Methode der Längsdehnung durchgeführt. Um mit mäßigen Belastungen auszukommen, wurden verhältnismäßig dünne Drähte von 0,2—0,8 mm Durchmesser gewählt. Die Drathenden wurden mit Hartlot in die zentrale Bohrung kleiner Schrauben eingelötet, von denen die eine in einen starken, beiderseits in die Mauer eingelassenen Balken eingeschraubt wurde, die andere in einen Haken, in welchen

die Wagschale für die Belastungsgewichte eingehängt wurde (Fig. 2). An der Unterseite der Wagschale war ein Eisenkern befestigt, der in ein Solenoid s eintauchte. Wurde Strom durch die Windungen des Solenoids geschickt, so wurde der Eisenkern angezogen und zu der auf der Wagschale ruhenden Belastung trat noch eine zweite durch die Wechselwirkung von Solenoid und Eisenkern erzeugte Belastung hinzu. Durch einen im Solenoidstromkreis befindlichen Schalter war es ermöglicht, die zusätzliche Belastung kurzdauernd periodisch wirken zu lassen und zwar wurde die gleichmäßige periodische Schließung und Oeffnung des Stromes mittels eines Uhrpendels bewirkt. Durch einen Widerstand W konnte die durch das Solenoid fließende Stromstärke so geregelt werden, daß auf den Eisenkern eine Anzugskraft von 75, 100, 125 oder 150 g ausgeübt wurde. Die Größe dieser Kraft wurde direkt durch Wägung bestimmt.

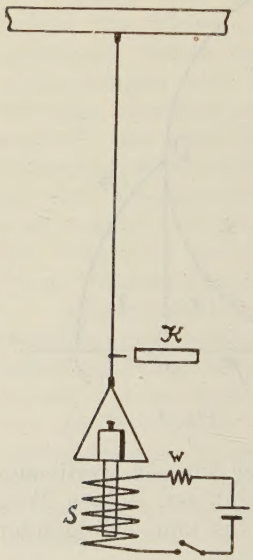

Fig. 2.

Um die lineare Dilatation der Drähte zu messen, wurde zunächst eine empfindliche Spiegelablesung verwandt, die sich aber, wahrscheinlich wegen der mit den periodischen Belastungsschwankungen verbundenen Erschütterungen hier als unzuverlässig erwies.

Auch ergab sich, daß das Kathetometer genügend genaue Ablesungen ermöglichte und so sind denn mittels des Kathetometers sämtliche im Folgenden mitgeteilten an Drähten gewonnene Werte erhalten, wobei die Drähte senkrecht frei aufgehängt waren.

Dabei wurde mit dem Fernrohr K des Kathetometers auf die dünn ausgehämmerte Spitze einer hakenförmig gebogenen Nadel gesehen, welche über das untere Ende des Drahtes geschoben wurde. Bei den Versuchen wurde die Eintauchtiefe des Eisenkerns in die Solenoidspule konstant erhalten. Zu diesem Zwecke ruhte die Spule auf einem teleskopartig verschiebbaren Ständer.

b) Versuchsergebnisse.

a) Kupferdraht.

Zunächst wurden weiche Kupferdrähte von 0,5 mm Durchmesser untersucht. Festgestellt wurden

1. die den einzelnen Belastungen entsprechenden relativen Dehnungen $\frac{L-L_0}{L_0}$, wobei L_0 die ursprügliche Länge des Drahtes, welche der Belastung Null bezw. einem kleinen

Streckgewichte entspricht, L die einer beliebigen anderen Belastung entsprechende Drahtlänge bedeutet.

2. Der Verlauf der Längenänderung des Drahtes hinsichtlich der Zeit nach Aenderung der Belastung.

In Tabelle I und Figur 3 sind die Werte für die Dehnungen wiedergegeben, welche am Kupferdraht I unter fortwährender Einwirkung der periodischen Belastungsschwankungen erhalten wurden. Die Werte wurden erhalten, indem nach Feststellung der bei der Belastung Null vorhandenen ursprünglichen Draht-

Tabelle I. (Fig. 3.)
Kupferdraht I.

Durchm. = 0,5 mm; Querschnitt = 0,106 qmm;
L_0 = 793,00 mm.

Belastgn. in kg	Kath.-Ablesung in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	269,90	—	—	Belastungsschwankungen um + 150 g.
0,30	270,20	0,30	0,000378	
0,50	270,225	0,325	0,000409	
0,75	270,35	0,45	0,000567	
1,00	270,57	0,67	0,000842	
1,25	271,39	1,49	0,00184	
1,50	273,34	3,44	0,004338	
1,75	277,57	7,67	0,009672	
1,85	279,95	10,05	0,012673	
2,00	282,95	13,05	0,016456	
2,10	286,55	16,65	0,020996	
2,25	291,54	21,64	0,02728	
2,40	298,14	28,24	0,03561	
2,50	302,39	32,49	0,04097	
2,70	314,65	44,75	0,05643	
3,00	332,72	62,82	0,07921	

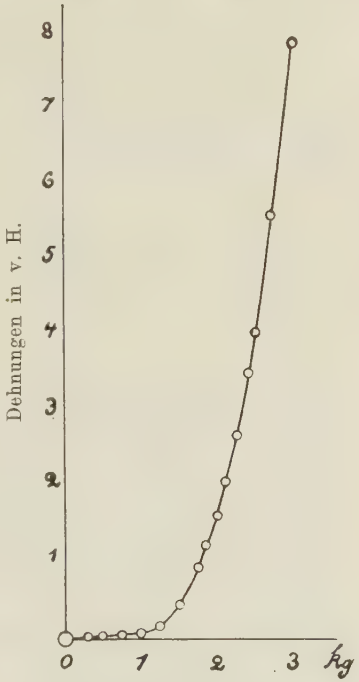

Fig. 3.

länge die Belastung stufenweise auf 0,3, 0,5, 0,8 . . . . . 3,0 kg erhöht wurde. Nach Aufsetzen eines neuen Belastungsgewichts wurde der Draht solange den kleinen zusätzlichen Belastungen durch die Elektromagneteinrichtung unterworfen, bis keine merkbaren Längenänderungen mehr erfolgten, die Länge des Drahtes unter dem Einflusse der auf der Wagschale ruhenden Belastung und der zusätzlichen Belastungsschwankung also konstant geworden war. Die Belastungsschwankungen hatten bei dem Kupferdraht I die Größe von 150 g. Sie erfolgten 68 mal in jeder Minute, und wurden wie bemerkt, durch das Pendel einer Uhr bewirkt, welches durch Quecksilber schlug und dabei den Solenoidstromkreis schloß. Stromschlüsse und Stromunterbrechungen dauerten ziemlich gleich lange, also jedesmal nicht ganz eine halbe Sekunde. Die

Ablesungen erfolgten bei geöffneten Solenoidstromkreis, also ohne die zusätzliche Belastung von 150 g.

In Tabelle I sind in Spalte 1 die ruhenden Belastungen, in Spalte 2 die Kathetometer-Ablesungen, in Spalte 3 die wirklichen Verlängerungen $L - L_0$ und in Spalte 4 die relativen Dehnungen $\frac{L-L_0}{L_0}$ eingetragen.

Die Werte der Spalte 2 der Tabelle I sind diejenigen Endwerte, bei denen eine weitere Verlängerung des Drahtes unter der zugehörigen Belastung und dem Einflusse der kleinen Belastungsschwankungen um + 150 g nicht mehr eintrat.

Der zeitliche Verlauf der Verlängerung des Drahtes 1 vom Augenblick des Aufsetzens einer neuen Belastung an ist für verschiedene Belastungen in den Tabellen II—V und den zugehörigen Figuren 4—7 wiedergegeben, bei denen als Abscissen die Zeiten, als Ordinaten die Verlängerungen eingetragen sind.

So zeigen Tabelle II und Figur 4 den zeitlichen Verlauf der Verlängerung des Drahtes

Tabelle II. (Fig. 4.)

Belastgn. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesung in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
2,0	0	279,95	—	Belastungs-Schwankungen um + 150 g
„	0^{15}	282,15	2,20	
„	0^{30}	282,50	2,55	
„	0^{45}	282,65	2,70	
„	1^{00}	282,82	2,87	
„	1^{15}	282,84	2,89	
„	2^{15}	282,95	3,00	
„	„	„	„	

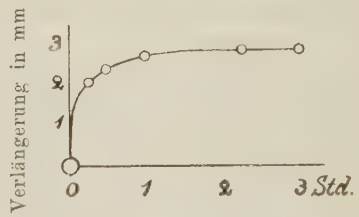

Fig. 4.

nach Aufsetzen der Belastung von 2 kg. Wie aus Tabelle I ersichtlich, zeigte das Kathetometer als Endwert der Belastung von 1,85 kg und als Anfangswert der Belastung von 2 kg den Wert 279,95 mm.

Tabelle III und Figur 5 zeigen den zeitlichen Verlauf der Verlängerung des Drahtes nach Aufsetzen von 2,7 kg, nachdem als Endwert der Belastung mit 2,5 kg der Kathetometerwert 302,39 gefunden war. Sowohl in Tabelle III als auch in Figur 5 sind die gefundenen Werte nur für die ersten 6 Stunden und 30 Minuten eingetragen.

Als Endwert wurde nach noch lange Zeit fortgesetzten Belastungsschwankungen um + 150 g der Kathetometerwert 314,65 gefunden. Während des Zeitwertes 30 Minuten bis 1 Stunde 40 Minuten — Punkt a bis b der Figur 5 — fanden keine Belastungsschwankungen statt, während die Belastung von 2,7 kg an dem Drahte hängen blieb. Während dieser Ruhepause trat keine oder doch nur eine ganz geringfügige Längenänderung des Drahtes ein. Dagegen steigt sofort nach Wiedereinsetzen der Belastungsschwankungen die Verlängerung rasch an, sodaß es

scheint, als ob in der Ruhepause eine latente Wirkung vorhanden sei, die sofort bei Wiederaufnahme der Belastungsschwankungen in die Erscheinung tritt. Der Draht ruht sich gewissermaßen aus, um bei Wiederaufnahme der Belastungsschwankungen wieder

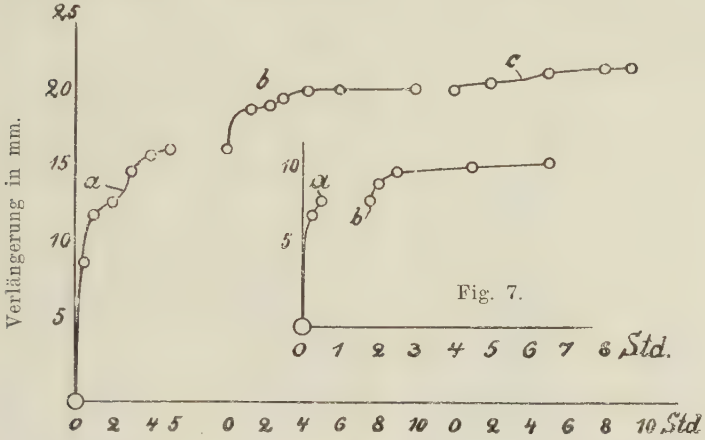

Fig. 7.

Fig. 5.

und zwar in schnellerem Tempo als zuletzt in der Verlängerung voranzuschreiten. Diese Erscheinung, die auch besonders deutlich aus der über die Fig. 5 gezeichneten Fig. 7 ersichtlich ist, trat stets nach einer Ruhepause in den Belastungsschwankungen auf und komme ich später noch darauf zurück.

Tabelle III. (Fig. 5).

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesung in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
2,7	0	302,39	—	Bel.-Schw. um 150 g
„	0^{15}	309,72	7,33	
„	0^{30}	310,55	8,16	ohne Bel.-Schw.
„	1^{40}	910,67	8,28	
„	2^{00}	311,83	9,44	
„	2^{30}	312,44	10,05	
„	3^{00}	312,58	10,19	Bel.-Schw. um 150 g
„	3^{45}	312,75	10,36	
„	4^{30}	312,84	10,45	
„	5^{30}	312,91	10,52	
„	6^{30}	313,05	10,66	

In Tabelle IV u. Fig. 6 ist der zeitliche Verlauf der Längenänderung des Drahtes nach Anhängen der Last von 3 kg wiedergegeben. Diese Längenänderung erstreckte sich über 339 Stunden 25 Minuten und noch immer war der Endwert nicht erreicht, die Kurve steigt immer noch. Die Kurve setzt sich aus Aesten zusammen, zwischen denen jedesmal eine längere Ruhepause ohne Belastungsschwankungen, jedoch mit angehängter ruhender Last liegt. Die Dauer der Ruhepausen ist in die Fig. 6 eingeschrieben.

Nach jeder Ruhepause ist das charakteristische schnelle Ansteigen beobachtbar, und zwar stärker während des ersten steiler ansteigenden Kurventeils, schwächer während des flacher ver-

Tabelle IV. (Fig. 6.)

Belastg. in kg.	Zeit in Std. u. Min.	Zeit n. d. letzt. Ruhzstd. in Std. u. Min.	Kath.-Ablsg. in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.	Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Zeit n. d. letzt. Ruhzstd. in Std. u. Min.	Kath. Ablsg. in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	2a	3	4	5	1	2	2a	3	4	5
3,0	0	0	314,65	—		3,0	91^{40}	3^{00}	328,54	13,89	
„	0^{10}	0^{10}	321,22	6,57		„	92^{40}	4^{00}	328,72	14,07	
„	0^{20}	0^{20}	321,90	7,25		„	93^{40}	5^{00}	328,84	14,19	
„	0^{30}	0^{30}	322,37	7,72		„	94^{40}	6^{00}	328,95	14,30	
„	1^{00}	1^{00}	323,00	8,35		„	95^{40}	7^{00}	331,05	16,40	Ruhe
„	1^{30}	1^{30}	323,36	8,71							
„	2^{00}	2^{00}	323,50	8,85	Ruhe	„	112^{40}	0	330,76	16,21	
						„	112^{45}	0^{05}	330,94	16,29	
„	16^{20}	0	323,20	8,85		„	112^{55}	0^{15}	331,00	16,35	
„	16^{25}	0^{05}	323,67	9,02		„	113^{10}	0^{30}	331,04	16,39	
„	16^{35}	0^{15}	323,82	9,17		„	113^{40}	1^{00}	331,08	16,43	
„	16^{50}	0^{30}	324,09	9,44		„	114^{40}	2^{00}	331,08	16,43	
„	17^{40}	1^{20}	324,39	9,74		„	116^{40}	4^{00}	331,09	16,44	
„	18^{40}	2^{20}	324,60	9,95		„	117^{40}	5^{00}	331,10	16,45	
„	19^{40}	3^{20}	324,72	10,07		„	119^{40}	7^{00}	331,14	16,49	Ruhe
„	21^{10}	4^{50}	325,01	10,36							
„	21^{40}	5^{20}	325,04	10,39		„	137^{10}	0	331,18	16,53	
„	22^{40}	6^{20}	325,12	10,47		„	137^{25}	0^{15}	331,29	16,64	
„	23^{40}	7^{20}	325,22	10,57		„	138^{10}	1^{00}	331,34	16,69	
„	24^{40}	8^{20}	325,35	10,70		„	139^{10}	2^{00}	331,34	16,69	
„	25^{40}	9^{20}	325,50	10,85		„	141^{10}	4^{00}	331,39	16,74	
„	27^{10}	10^{50}	325,75	11,10		„	142^{40}	5^{30}	331,39	16,74	Ruhe
„	27^{40}	11^{20}	325,83	11,18							
„	28^{40}	12^{20}	325,95	11,30		„	160^{25}	0	331,57	16,92	
„	29^{40}	13^{20}	326,13	11,48		„	161^{40}	1^{15}	331,65	17,00	
„	30^{10}	13^{50}	326,16	11,51	Ruhe	„	162^{40}	2^{15}	331,69	17,04	
						„	165^{40}	5^{15}	331,80	17,10	
„	64^{55}	0	326,16	11,51		„	166^{40}	6^{15}	331,84	17,19	
„	65^{00}	0^{05}	326,28	11,63		„	169^{40}	9^{15}	331,88	17,23	
„	65^{25}	0^{30}	326,30	11,65		„	171^{40}	11^{15}	331,89	17,24	Ruhe
„	65^{40}	0^{45}	326,53	11,88							
„	66^{10}	1^{15}	326,80	12,15		„	184^{25}	0	331,91	17,26	
„	66^{40}	1^{45}	327,01	12,36		„	185^{25}	1^{00}	331,94	17,29	
„	67^{40}	2^{45}	327,19	12,54		„	188^{25}	4^{00}	332,01	17,36	
„	68^{40}	3^{45}	327,39	12,74		„	190^{25}	6^{00}	332,06	17,41	
„	69^{40}	4^{45}	327,58	12,93		„	195^{25}	11^{00}	332,11	17,46	Ruhe
„	70^{10}	5^{15}	827,60	12,95							
„	71^{10}	6^{15}	327,70	13,05		„	328^{25}	0	332,10	17,46	
„	72^{10}	7^{15}	327,84	13,19		„	328^{30}	0^{05}	332,31	17,65	
„	73^{10}	8^{15}	328,00	13,35		„	328^{40}	0^{15}	332,35	17,70	
„	74^{10}	9^{15}	„	„	Ruhe	„	329^{25}	1^{00}	332,42	17,70	
						„	330^{25}	2^{00}	332,50	17,85	
„	88^{40}	0	327,56	12,91		„	331^{25}	3^{00}	332,55	17,90	
„	88^{55}	0^{15}	327,74	13,09		„	333^{25}	5^{00}	332,60	17,95	
„	89^{10}	0^{30}	327,83	13,18		„	335^{25}	7^{00}	332,65	18,05	
„	89^{40}	1^{00}	328,01	13,36		„	337^{25}	9^{00}	332,70	18,05	
„	90^{40}	2^{00}	328,14	13,49		„	338^{25}	11^{00}	332,72	18,07	

laufenden Teils. Zwischen dem vorletzten und letzten Kurvenast liegt eine Ruhepause von 133 Stunden. Während dieser langen Pause in den Belastungsschwankungen trat keine Längenänderung des Drahtes ein. Sofort mit Wiederaufnahme der Be-

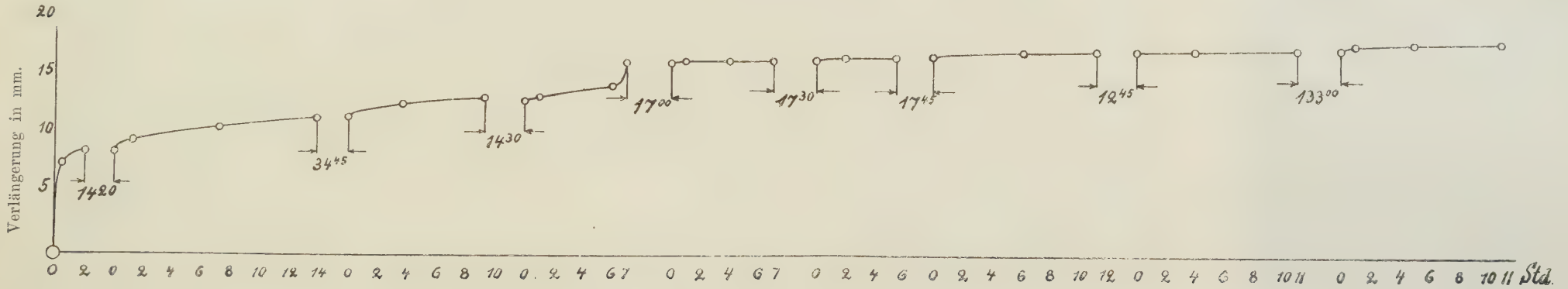
Verlängerung in mm.
20
15
10
5
14²⁰
3⁴⁵
14³⁰
17⁰⁰
17³⁰
17⁴⁵
12⁴⁵
13³⁰⁰
0 2 0 2 4 6 8 10 12 14 0 2 4 6 8 10 0 2 4 6 7 0 2 4 6 7 0 2 4 6 0 2 4 6 8 10 12 0 2 4 6 8 10 11 0 2 4 6 8 10 11 Std.

Fig. 6.

lastungsschwankungen erfolgte dann wieder eine beträchtliche Verlängerung des Drahtes. Dieser Anstieg der Kurve ist weit beträchtlicher als nach den voraufgehenden Pausen von $12^3/_4$, $17^3/_4$ und $17^1{}_2$ Stunden, sodaß sich die latente Wirkung als Funktion der Zeit darstellt.

Tabelle V. (Fig. 7.)

Belastg. in kg.	Zeit in Std. u. Min.	Zeit n. d. letzt. Ruhzstd. in Std. u. Min.	Kath.-Ablsg. in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	2a	3	4	5
3,3	0	0	681,00	—	
„	0^{15}	0^{15}	672,43	8,57	
„	0^{30}	0^{30}	671,79	9,21	
„	1^{00}	1^{00}	668,52	12,43	
„	2^{00}	2^{00}	667,90	13,10	
„	3^{00}	3^{00}	665,90	15,10	
„	4^{00}	4^{00}	664,83	16,17	
„	5^{00}	5^{00}	664,37	16,63	
3,3	42^{15}	0	664,37	16,63	
„	42^{20}	0^{05}	663,40	17,60	
„	43^{30}	1^{15}	661,60	19,40	
„	44^{30}	2^{15}	661,38	19,62	
„	45^{15}	3^{00}	661,00	20,00	
„	46^{30}	4^{15}	660,54	20,46	
„	48^{15}	6^{00}	660,44	20,56	
„	52^{15}	10^{00}	„	„	
3,3	65^{30}	0	660,44	20,56	
„	65^{45}	0^{15}	660,20	20,80	
„	66^{30}	1^{00}	660,10	20,90	
„	67^{30}	2^{00}	659,98	21,02	
„	70^{30}	5^{00}	659,29	21,71	
„	71^{30}	6^{00}	659,17	21,83	
„	73^{30}	8^{00}	659,06	21,94	
„	75^{00}	9^{30}	659,00	22,00	

Zwischen den Zeitwerten 94^{40} bis 95^{40} der Spalte 1 der Tabelle IV — am Ende des 4. Kurvenastes der Fig. 6 — erfolgte ein plötzliches Ansteigen der Drahtverlängerung von 14,30 auf 16,40 mm, d. h. um reichlich 2 mm. Während dieser Zeit — einer Stunde — wurde die Eintauchtiefe des Eisenkernes in die Solenoidspule versehentlich nicht konstant erhalten. Der Eisenkern tauchte also am Schlusse der Stunde um 2 mm zu tief ein. Die Anzugskraft bei dieser Eintauchtiefe des Eisenkerns wurde durch Wägung zu 155 g bestimmt. Es hatten sich demnach die Belastungsschwankungen zwischen den Zeitwerten 94^{40} bis 95^{40} der Spalte 1 der Tabelle IV allmählich von 150 g auf 155 g erhöht. Es bedeutet dies eine Erhöhung der Belastungsschwankungen von 5,00 v. H. auf 5,17 v. H. der ruhenden Belastung von 3,0 kg. In dieser prozentual sehr geringen Erhöhung der Belastungsschwankungen ist ein Mittel gegeben, in kürzerer Zeit als bei konstant gehaltenen Belastungsschwankungen die der bestimmten Belastung entsprechende Verlängerung zu erhalten.

Von diesem Mittel wurde Gebrauch gemacht bei der Feststellung der zu der Belastung von 3,3 kg gehörigen Zeitkurve. Es wurde dabei die Eintauchtiefe des Eisenkerns in das Solenoid nicht konstant gehalten, vielmehr fand erst nach einer geringen Ueberschreitung der normalen Eintauchtiefe eine Einregulierung auf die normale, einer Belastung von 150 g entsprechende Einstellung statt. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle V und Fig. 7 wiedergegeben. In der Fig 7 Seite 11 sind die mit a, b und c bezeichneten Stellen sofort als solche zu erkennen, an denen die Belastungsschwankungen den Normalwert von 150 g überschritten.

Wir sehen aus Fig. 7 und der Tabelle V auch wieder das

rasche Ansteigen der Verlängerung nach einer voraufgehenden Ruhepause.

Während die Tabellen 1, 2, 3 und 4 mit einem Kathetometer älterer Konstruktion aufgenommen wurden, wurde Tabelle 5 mit einem neuen Fuess'schen Kathetometer gefunden. In Tabelle 5 ist aber der Kathetometerwert nach einer Unterbrechung der Belastungsschwankungen gleich demjenigen vor der Unterbrechung. Während der Unterbrechung der Belastungsschwankungen tritt eine merkliche Längenänderung nicht ein. Die in den Tabellen 3 und 4 vorhandenen Differenzen in den Kathetometerwerten vor und nach einer Unterbrechung der Belastungsschwankungen beruhen auf der geringen Zuverlässigkeit des älteren Kathetometers.

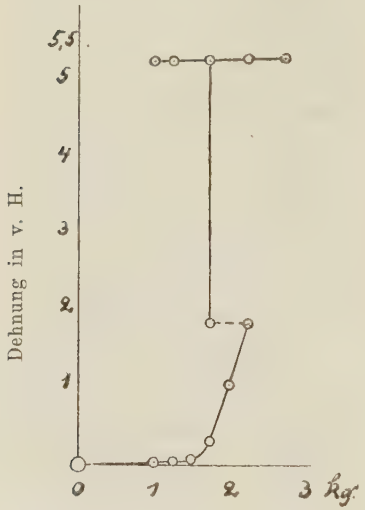

Fig. 8.

Tatsächlich tritt während einer Unterbrechung der Belastungsschwankungen eine merkbare Längenänderung des Drathes nicht ein, wie durch alle späteren Versuche an den verschiedensten Materialien bestätigt wurde.

Aus einem Vergleich der Figur 4 bis 7 läßt sich noch folgendes Ergebnis ziehen. Die Zeitkurve steigt plötzlich an und nähert sich dann allmählich einer Asymptote. Das Umbiegen der Kurve aus dem nahezu senkrechten zu dem nahezu wagrechten Verlauf erfolgt um so plötzlicher, je kleiner die ruhende Belastung ist. Je höher die ruhende Belastung ist, um so längere Zeit wird bei konstanten Belastungsschwankungen erfordert, um zu dem Endwert der Verlängerung zu gelangen.

Einen Vergleich der unter Anwendung der Belastungsschwankungen um 150 g gewonnenen Dehnungskurve der Fig. 1 mit einer ohne Belastungsschwankungen gewonnenen ermöglicht der untere Teil der Fig. 8, welche an einem Kupferdraht von derselben Art und Stärke, aber ohne Anwendung von Belastungsschwankungen gewonnen wurde. Zu Fig. 8 gehört Tabelle VI.

Zuerst wurde bei diesem Versuch allmählich ansteigend bis zu 2,25 kg belastet. Die Ablesungen wurden ca. $^1/_4$ Stunde nach Aufsetzen der Belastungen gemacht. Während dieser Zeit war der größte Teil der ohne Belastungsschwankungen erfolgenden Verlängerung bereits eingetreten und letztere nahm nur noch sehr wenig zu. Von 2,25 kg wurde auf 1,75 kg entlastet, wobei eine merkliche Längenänderung des Drahtes nicht eintrat. Bei 1,75 kg wurde sodann mit den Belastungsschwankungen um + 150 g begonnen. Es erfolgte sofort eine starke Verlängerung

des Drahtes, welche nach ca. 3 Stunden ihren Endwert nahezu erreicht hatte. Die Dehnung stieg dabei bis über 5 v. H. an. Darauf wurde auf 1,25 und dann auf 1,0 kg entlastet und nach jeder Entlastung wurden die kleinen Belastungsschwankungen um + 150 g angewandt. Die geringe Verkürzung des Drahtes erfolgte sofort bei der Entlastung. Eine Wirkung der auf die Entlastung folgenden Belastungsschwankungen um + 150 g konnte überhaupt nicht bemerkt werden.

Nach der Entlastung auf 1,0 kg wurde auf 2,75 kg belastet und abgelesen ohne daß vorher die Belastungsschwankungen um + 150 g zur Anwendung gebracht wurden. Darauf wurde auf 2,25 kg entlastet. Der in Fig. 8 und Tabelle VI für diese Belastung eingetragene Wert wurde nach Anwendung der auch hier einflußlosen Belastungs-Schwankungen um + 150 g gewonnen, ebenso wie die Werte für 1,0, 1,25 und 1,75 kg. Wie Fig. 8 zeigt liegen die vier Werte in einer Geraden.

Tabelle VI. (Fig. 8.)
Kupferdraht II.

Durchm. = 0,5 mm; Querschn. = 0,196 qmm;
L_0 = 696,00 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablsg. in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	171,60	—	—	ohne Belastungs-Schwankungen
1	171,75	0,15	0,000215	
1,25	171,90	0,30	0,000431	
1,50	172,20	0,60	0,000862	
1,75	173,80	2,20	0,003161	
2,0	179,00	7,40	0,010630	
2,25	184,70	13,10	0,01882	
1,75	184,70	13,10	0,018820	entlastet
1,75	208,65	37,05	0,053233	mit Belstg.-Schwankg. um 150 g
1,25	208,60	37,00	0,053160	
1,00	208,55	36,95	0,053089	
2,75	208,85	37,25	0,053520	belastet
2,25	208,72	37,12	0,053333	

Wenn das Verhalten des Drahtes der Duhem'schen Theorie entspräche, so hätte er sich nach Entlastung auf 1,25 und 1,0 kg unter dem Einflusse der kleinen Belastungsschwankungen so weit verkürzen müssen, daß die entsprechenden Werte in einer Dehnungskurve gleich der in Fig. 1 dargestellten lägen. Tatsächlich haben die kleinen Belastungsschwankungen um 150 g nach einer Entlastung gar keinen Einfluß; denn die geringfügige Verkürzung trat, wie schon gesagt, sofort bei der Entlastung auf und sie ist der Entlastung proportional. Augenscheinlich sind also die Voraussetzungen der Theorie hier nicht erfüllt.

Die Ergebnisse eines Versuches am Drahte Nr. 3 von ebenfalls 0,5 mm Durchmesser sind in Tabelle VII und Fig. 9 wiedergegeben. Der Versuch wurde in folgender Weise durchgeführt: Der Draht wurde sofort mit 3,0 kg belastet. Während der ersten halben Stunde wurde der Draht ruhig hängen gelassen.

Darauf (Punkt a der Kurve) wurde mit den Belastungsschwankungen um + 150 g begonnen. Nach einer Stunde (Punkt b der Kurve) wurde auf 0,3 kg entlastet, wobei augenblicklich eine Verkürzung eintrat, die während der folgenden 5 Stunden (bis Punkt c der Kurve) keine Aenderung erfuhr, trotzdem während

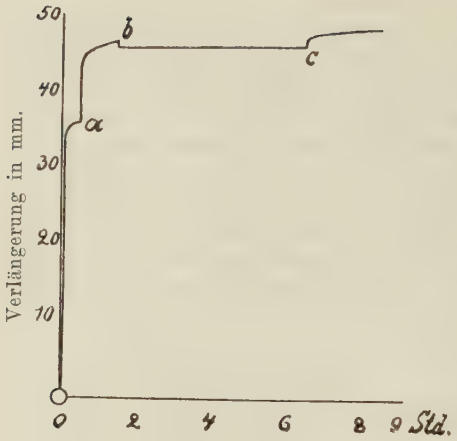

Fig. 9.

Tabelle VII. (Fig. 9.)
Kupferdraht III.

Durchm. = 0,5 mm; Querschn. = 0,196 qmm; L_0 = 822 mm.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L-L_0$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	—	716,40	—	
3,0	0	716,40	—	
„	0^{6}	680,90	35,50	ohne Bel.-Schw.
„	0^{15}	680,20	36,20	
„	0^{30}	679,82	36,58	
	0^{36}	671,05	45,35	Belast.-Schw. um 150 g
„	0^{45}	670,32	46,08	
„	1^{00}	669,80	46,60	
„	1^{30}	669,10	47,30	
0,3	1^{30}	670,20	46,20	Entlastung
„	2^{30}	„	„	
„	3^{30}	„	„	Belast.-Schw. um 150 g
„	4^{30}	„	„	
„	5^{30}	„	„	
„	6^{30}	„	„	
3,0	6^{30}	—	—	Belastung
„	6^{36}	668,65	47,75	
„	6^{45}	668,48	47,92	Belast.-Schw. um 150 g
„	7^{00}	668,37	48,03	
„	7^{30}	668,12	48,28	
„	8^{30}	667,75	48,65	

dieser Zeit die Belastungsschwankungen um 150 g ununterbrochen in Anwendung waren. Hiernach wurde die Belastung wieder auf 3,0 kg erhöht (Punkt c der Kurve) und mit den Belastungsschwankungen fortgefahren.

Der Versuch bestätigt zunächst das am Drahte Nr. 2 gewonnene Ergebnis, daß nämlich nach einer Entlastung die kleinen Belastungsschwankungen keinen Einfluß haben, wenigstens nicht dahin, daß sie — wie die Duhem'sche Theorie verlangt — eine Verkürzung des Drahtes auf denjenigen Wert bewirken, welcher bei ansteigender Belastung — ohne vorherige höhere Belastung — gewonnen worden wäre. Nach der Duhemschen Theorie hätte die Kurve (Fig. 9) von Punkt b an fast bis auf die Abcissenachse fallen müssen.

Aus Fig. 9 ist noch ersichtlich, daß sofort beim Einsetzen der Belastungsschwankungen (Punkt a der Kurve) die Verlängerung von 36,58 auf 45,35 mm stieg, und daß die Entlastung unter Belastungs - Schwankungen (zwischen b und c) ebenso wie eine Ruhepause in den Schwankungen wirkt. Die Kurve erscheint hinter c gewissermaßen als Fortsetzung der Kurve vor b.

Die in Tabelle VIII und Fig. 10 wiedergegebenen Versuche sind ebenfalls an einem Kupferdraht von 0,5 mm Durchmesser gewonnen. Abweichend von den bisherigen Versuchen wurde iher die

prozentuale Größe der Belastungsschwankungen im Verhältnis zu der ruhenden Belastung konstant gehalten. So betrugen die Belastungsschwankungen bei 1,5 kg ruhender Belastung 75 g, bei 2,0 kg 100 g, bei 2,5 kg 125 g und bei 3,0 kg 150 g, also stets 5 v. H. der ruhenden Belastung. Die im Vorauf-

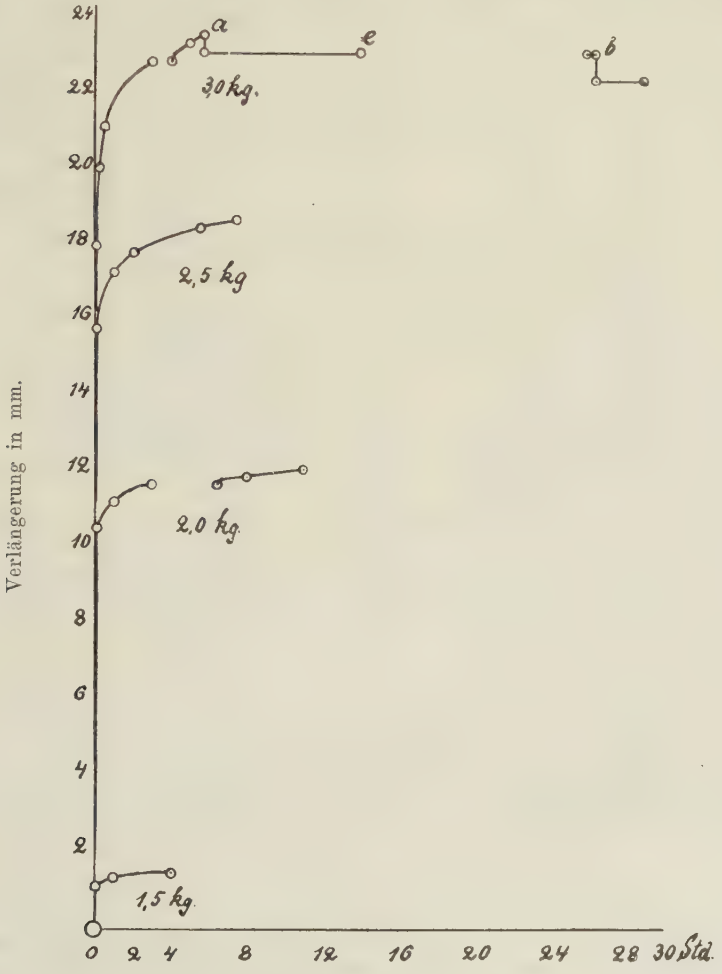

Fig. 10.

gehenden gewonnenen Ergebnisse werden durch diesen Versuch vollauf bestätigt. Zunächst sehen wir, daß trotz der größeren Belastungsschwankungen bei den höheren Belastungen die Zeitkurve für letztere viel langsamer umbiegt, d. h. es ist umsomehr Zeit erforderlich, um mit Hülfe der kleinen Belastungsschwankungen den Endwert der Drahtverlängerung zu erhalten, je höher die Belastung ist. — In Fig. 10 sind sämtliche Ordinaten von der

Tabelle VIII. (Fig. 10.)

Kupferdraht IV.

Durchm. = 0,5 mm; Querschn. = 0,196 qmm; L_0 = 840,7 mm.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L-L_0$ in mm	Bemerkg.	Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L-L^1$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1,0	—	697,85	—		2,5	2^{00}	666,20	17,85	
					„	2^{45}	665,93	18,12	
1,5	0	697,85	—		„	3^{30}	665,87	18,18	Bel.-Schw.
„	0^{5}	696,69	1,16		„	4^{30}	665,71	18,34	um + 125 g
„	0^{30}	696,53	1,32		„	5^{30}	665,52	18,53	
„	1	696,45	1,40	Bel.-Schw.	„	6^{30}	665,41	18,64	
„	2	696,39	1,46	um + 75 g	„	7^{30}	665,31	18,74	
„	3	696,35	1,50						
„	4	696,32	1,53		3,0	0	663,40	—	
2,0	0	696,29	—		„	0^{6}	645,35	18,05	
„	0^{6}	685,70	10,59		„	0^{15}	643,34	20,06	Bel.-Schw.
„	0^{15}	685,50	10,79		„	0^{30}	642,22	21,18	um + 150 g
„	0^{45}	685,22	11,07	Bel.-Schw.	„	0^{45}	641,77	21,63	
„	1^{00}	685,00	11,29	um + 100 g	„	1	641,44	21,96	
„	1^{30}	684,81	11,48		„	1^{45}	640,98	22,42	
„	2^{00}	684,66	11,63		„	3^{00}	640,49	22,91	Ruhezustand
„	3^{30}	684,53	11,76	Ruhezust.					
„	6^{30}	„	„		„	4^{00}	640,49	22,91	Ruhezustand
„	6^{36}	684,44	11,85		„	4^{06}	640,33	23,07	
„	7^{00}	684,40	11,89		„	4^{30}	640,21	23,19	
„	8^{00}	684,34	11,95	Bel.-Schw.	„	5^{00}	640,00	23,40	Bel.-Schw.
„	9^{00}	684,29	12,00	um + 100 g	„	5^{45}	639,75	23,65	um + 150 g
„	10^{00}	684,24	12,05						
„	11^{00}	684,19	12,10		2,0	5^{45}	640,29	23,17	
					„	14^{00}	„	„	Ruhezust.
2,5	0	684,05	—						
„	0^{6}	668,20	15,85		„	26^{00}	640,29	23,17	
„	0^{15}	667,68	16,37	Bel.-Schw.	„	26^{30}	„	„	
„	0^{30}	667,22	16,83	um + 125 g					Bel.-Schw.
„	0^{45}	666,90	17,15		0,3	26^{30}	640,99	22,41	um + 150 g
„	1^{00}	666,70	17,35		„	29	„	„	

Abscissenachse aus gemessen und stellen diejenigen Verlängerungen dar, welche durch die Belastungszunahme von jedesmal 0,5 kg erhalten wurden. Die Gesamtverlängerung des Drahtes wird durch die Summe der vier Endordinaten der 4 Kurven der Fig. 10 dargestellt. In Fig. 10 und Tabelle VIII sind nur die Werte für die rasch ansteigenden Kurventeile eingetragen. Die Belastungsschwankungen wurden jedoch bei den drei unteren Kurven noch weiter fortgesetzt, bis der Endwert der Verlängerung nahezu erreicht war.

Weiterhin wird bestätigt, daß die Verlängerung nach einer Ruhepause unter den Belastungsschwankungen wieder rasch ansteigt, und sich die Drahtlänge während einer Ruhepause nicht ändert.

Durch die oberste Kurve wird auch bestätigt, daß die kleinen Belastungsschwankungen nach einer Entlastung keinen Einfluß haben und daß die bei einer Entlastung plötzlich auch ohne Belastungsschwankungen auftretende kleine Verkürzung der Entlastung proportional ist. Im Punkte a der oberen Kurve wurde von 3,0 auf 2,0 kg entlastet, im Punkte b von 2,0 auf 0,3 kg. Nach der Entlastung auf 2,0 kg und nachdem darauf bis zum Kurvenpunkte e die kleinen Belastungsschwankungen in Anwendung gewesen waren, folgte eine 12 stündige Ruhepause. Auch nach dieser Pause hatten die noch $^1/_2$ Stunde bei derselben Belastung fortgesetzten Belastungsschwankungen keinen Einfluß.

II. Teil.

Versuche an Eisenbindedraht.

An zweiter Stelle wurde Eisenbindedraht, sog. Blumendraht von 0,3 mm Durchmesser untersucht. Eine an einem solchen

Tabelle IX. (Fig. 11.)

Eisenbindedraht Nr. 1.

Durchm. = 0,3 mm; Querschn. = 0,070 qmm; L_0 = 900 mm.

Belastg in kg	Kath.-Ablesg. in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	708,65	—	—	Belastungs-Schwankungen um + 150 g
1,0	707,94	0,71	0,000788	
1,5	707,21	1,44	0,0016	
1,75	706,54	2,11		
2,0	706,20	2.45	0,002722	
2,25	702,83	5,82	0,006466	
2,50	694,18	14,47	0,016077	
2,75	681,90	26,75	0,029722	
3,0	664,52	44,13	0,049033	

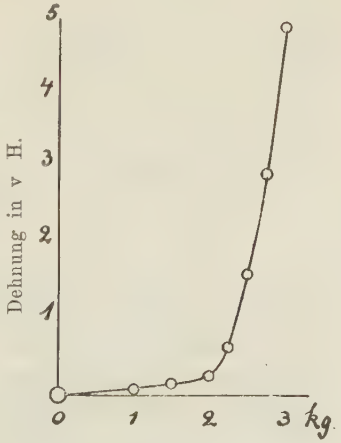

Fig. 11.

Draht unter Belastungsschwankungen um + 150 g gewonnene Dehnungskurve ist in Fig. 11 dargestellt. Die Zahlenwerte sind in Tabelle IX eingetragen.

Der zeitliche Verlauf der Längenänderung des Drahtes bei den Belastungen 2.25, 2.5, 2.75 und 3 kg ist aus Fig. 12 und Tabelle X ersichtlich. Diese Kurven zeigen ebenso wie die an Kupferdraht gewonnenen und in den Fig. 4—8 wiedergegebenen Zeitkurven das rasche Ansteigen der Verlängerung nach Erhöhen der Belastung. Ein Vergleich der Kurven für Eisen und Kupferdraht lehrt aber auch einen Unterschied in dem Verhalten beider Materialien indem die Zeitkurven für Eisen sehr rasch — schon

in einigen Stunden — in die Wagrechte übergehen, während bei Kupfer, besonders bei den höheren Belastungen, hierüber Tage und Wochen vergehen.

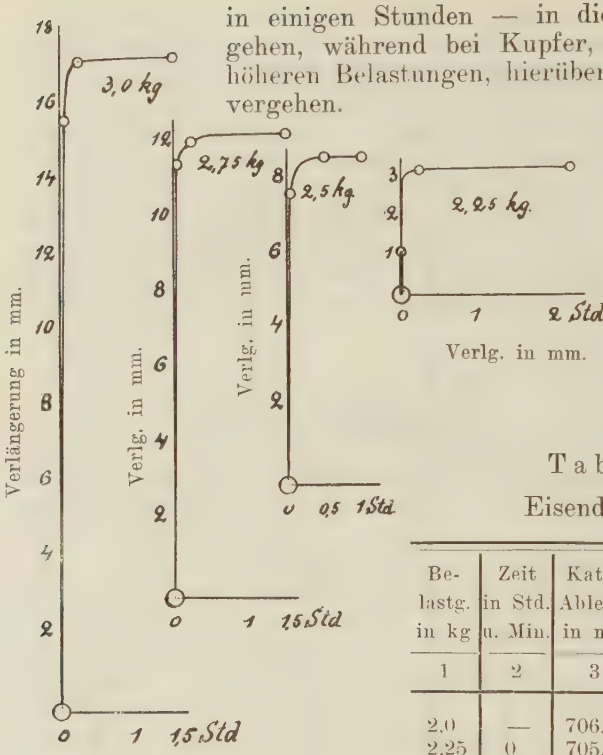

Fig. 12.

In Fig. 12 ist in der Zeitkurve für 2,25 kg ein Stück der Ordinate stark ausgezogen. Um soviel verlängerte sich der Draht sofort bei Erhöhung der Belastung auf 2,25 von 2,0 kg schon vor dem Beginn der Belastungsschwankungen. Bei den höheren Belastungen ist diese augenblickliche Verlängerung ganz gering. Sie ist im Verhältnis zu der gesamten Verlängerung um so bedeutender, je näher die betr. Belastung der Elastizitätsgrenze des Materials liegt. Der Draht riß bei 3,25 kg, nachdem er 2 Minuten die Belastungsschwankungen um + 150 g ausgehalten hatte.

Der in Folgendem mitgeteilte Versuch am Eisenbindedraht Nr. 2 hatte hauptsächlich denselben Zweck, wie der in Tabelle VI und Fig. 9 behandelte Versuch an Kupfer-

Tabelle X.

Eisendraht Nr. 1.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkungen
1	2	3	4	5
2,0	—	706,20	—	o. Bel.-Schw.
2,25	0	705,06	1,14	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^2	703,10	3,10	
„	0^4	703,02	3,18	
„	0^{15}	702,88	3,32	
„	0^{45}	702,85	3,35	
„	2^{15}	702,83	3,37	
2,5	0	702,70	0,13	o. Bel.-Schw.
„	0^3	695,12	7,71	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^6	694,60	8,23	
„	0^{12}	694,30	8,53	
„	0^{30}	694,18	8,65	
„	1^{00}	„	„	
2,75	0	694,09	0,09	o. Bel.-Schw.
„	0^3	682,70	11,48	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^6	682,36	11,82	
„	0^{15}	682,10	12,08	
„	0^{30}	681,92	12,26	
„	1^{30}	681,90	12,28	
3,0	0	681,61	0,29	o. Bel.-Schw.
„	0^3	666,18	15,72	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^6	665,06	16,84	
„	0^{15}	664,63	17,27	
„	0^{30}	664,56	17,34	
„	1^{30}	664,52	17,38	
3,25	0	664,40	0,12	o. Bel.-Schw.
„	0^2	—	—	Bruch

draht Nr. 3, nämlich festzustellen, ob nach einer Entlastung die kleinen Belastungsschwankungen eine Verkürzung des Drahtes auf denjenigen Wert bewirken, welcher bei ansteigender Belastung — ohne vorherige höhere Belastung — gewonnen worden wäre. Das Ergebnis war auch hier negativ. Die kleinen Belastungs - Schwankungen hatten nicht den der Duhem'schen Theorie entsprechenden Einfluß.

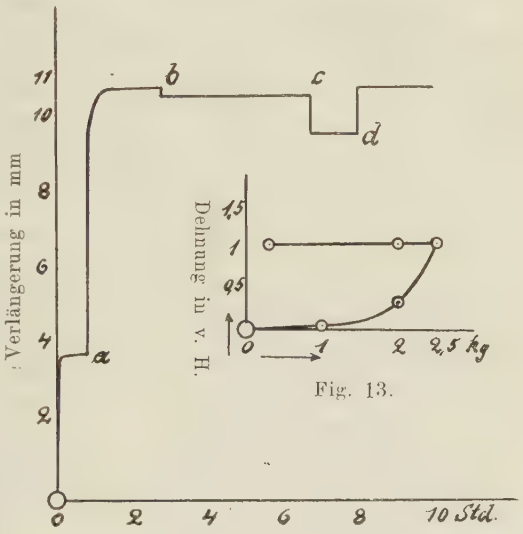

Fig. 13.

Fig. 14.

Die bei ansteigender und ebenso die bei fallender Belastung unter Einwirkung der kleinen Belastungsschwankungen um + 150 g erhaltenen Dehnungen sind in Tabelle XI und Fig. 13 eingetragen. Die bei abnehmender Belastung auftretenden Kontraktionen sind ganz gering und der Entlastung proportional, wie wir es auch für Kupfer gefunden hatten.

Aus Fig. 14 u. Tabelle XII läßt sich der zeitliche Verlauf der Verlängerung und Verkürzung des Drahtes vom Augenblick der Belastung mit 2,5 kg an verfolgen. Während der ersten 45 Minuten — bis Punkt a der Kurve — wirkte auf den Draht nur die ruhende Belastung von 2,5 kg ein. Die dann einsetzenden kleinen Belastungs - Schwankungen um + 150 g hatten sofort ein starkes Ansteigen der Verlängerung zur Folge. Im Punkt b der Kurve wurde auf 2,0 kg entlastet. Im selben Augenblick, bevor noch die während der Entlastung unterbrochenen kleinen Belastungsschwankungen wieder aufgenommen waren, trat eine geringe Verkürzung ein. Dasselbe war der Fall bei der weiteren

Tabelle XI.

Eisenbindedraht Nr. 2.

Durchm. = 0,3 mm; Querschnitt = 0,0707; L_0 = 854 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	$L - L_0$ in mm	$\frac{L - L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	755,00	—	—	Bel.-Schwankg. um + 150 g
1,0	754,53	0,47	0,000550	
2,0	751,75	3,25	0,003805	
2,5	740,80	14,20	0,016627	
2,0	741,05	13,95	0,016334	
0,3	742,02	12,98	0,015199	
2,5	740,80	14,20	0,016627	
3,0	—	—	—	Bruch

Entlastung von 2,0 auf 0,3 kg — Punkt c der Kurve —. Die auf die Entlastungen folgenden kleinen Belastungsschwankungen um + 150 g hatten auf die Drahtlänge gar keinen oder doch nur einen verschwindend geringen Einfluß.

Tabelle XII.

Eisenbindedraht Nr. 2.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L—L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
2,5	0	751,75	—	
„	0^{3}	748,09	3,66	ohne Bel.-Schw.
„	0^{7}	748,00	3,75	
„	0^{15}	747,92	3,83	
„	0^{45}	747,88	3,87	
„	0^{48}	742,20	9,55	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^{52}	741,49	10,26	
„	1^{00}	741,20	10,55	
„	1^{15}	740,92	10,83	
„	1^{45}	740,87	10,88	
„	2^{45}	740,80	10,95	
2,0	2^{45}	741,10	10,65	entlastet
„	3^{45}	741,05	10,70	
„	6^{45}	„	„	
0,3	6^{45}	742,02	9,73	entlastet
„	7^{45}	„	„	
„	8^{00}	„	„	
2,5	8^{00}	740,80	10,95	belastet
„	9^{00}	„	„	
„	10^{00}	„	„	
3,0	—	—	—	Bruch

Im Punkte d der Kurve wurde wieder auf den Wert von 2,5 kg belastet. Im selben Augenblick und noch vor Wiederaufnahme der während der Belastung unterbrochenen kleinen Belastungsschwankungen trat eine Verlängerung des Drahtes auf genau den Wert vor der Entlastung im Punkt b ein. Unter den dann folgenden kleinen Belastungsschwankungen um + 150 g trat eine Längenänderung des Drahtes nicht ein.

Der Draht riß bei 3,0 kg, nachdem die hauptsächlichste, dieser Belastung zukommende Verlängerung bereits eingetreten war.

Man kann das Ergebnis so ausdrücken, dass die Belastungsschwankungen das Material zu einem bis zur Bruchgrenze nahezu vollkommen elastischen machen, oder daß die Elastizitätsgrenze bis zur Bruchgrenze ausgedehnt wird.

III. Teil.

Versuche an Stahldraht (Klavierdraht).

Die Dehnungskurve eines harten Stahldrahtes (Klavierdraht) von 0,2 mm Durchmesser, die unter Belastungsschwankungen um + 150 gr gewonnen wurde, ist in Fig. 15 dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in die Tabelle XIII eingetragen.

Die der Belastung 0 entsprechende Kathetometer-Lage wurde errechnet, indem die Längenänderung von 0 auf 1,0 kg. gleichgesetzt wurde der Aenderung (0,70 + 0,62) von 1,0 auf 2,0 kg.

Der Draht riß bei 8,5 kg nach etwa $^1/_2$ Stunde Belastungsschwankungen und nachdem kurz vorher eine Ablesung gemacht war.

Der hochelastische Stahldraht, dessen Dehnungskurve sich erst von etwa 4 kg an schwach nach oben krümmt, zeigt nur eine sehr schwache elastische Nachwirkung. Um trotzdem eine Zeitkurve zu erhalten, wurde bei dem folgenden Versuch (Fig. 16

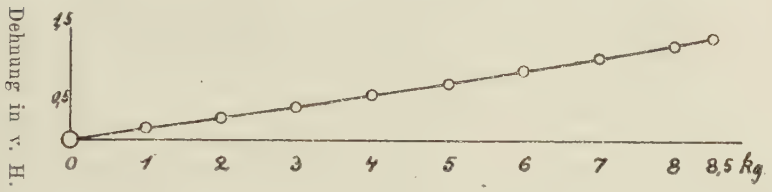

Fig. 15.

und 17 und Tabelle XIV und XV) an einem gleichen Stahldraht so verfahren, daß zunächst ohne die kleinen Belastungsschwankungen bis 6,5 kg belastet wurde (untere Kurve der Fig. 16). Erschütterungen des Drahtes beim Aufsetzen der Gewichte wurden möglichst vermieden. Bei 6,5 kg wurde dann bei Belastungsschwankungen um + 150 g die Zeitkurve (Fig. 17) aufgenommen.

Der dick gezeichnete senkrechte Teil der Kurve Fig. 17 stellt denjenigen Teil der Längenänderung dar, der schon vor den kleinen Belastungsschwankungen sofort beim Erhöhen der Belastung von 6,0 auf 6,5 kg eintrat. Im Uebrigen gleicht die Zeitkurve für Stahldraht den für Kupfer- und Eisendraht gefundenen.

Von 6,5 kg an wurde darauf wieder unter Belastungsschwankungen um + 150 g bis auf 0,3 kg entlastet. (Obere Kurve der Fig 16). Dieser absteigende Teil der Dehnungskurve ist wieder eine Gerade, wie wir es schon für Kupfer (Fig. 8) und Eisen (Fig. 13) gefunden hatten. Die Verkürzungen traten auch beim Stahldraht sofort und ohne die kleinen Belastungsschwankungen ein.

Tabelle XIII.

Stahldraht (Klavierdraht) Nr. 1.

Durchm. 0,2 mm; Querschn. 0,0314 mm²; $L_0 = 905$ mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesung in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	(691,27)	—	—	berechnet
0,5	690,71	—	—	
1,0	689,91	1,36	0,00150	
1,5	689,15	2,12	0,00234	
2,0	688,55	2,72	0,00300	
2,5	687,81	3,46	0,00382	
3,0	687,10	4,17	0,00460	
3,5	686,49	4,78	0,00528	
4,0	685,81	5,46	0,00603	
4,5	685,13	6,14	0,00678	
5,0	684,49	6,78	0,00749	
5,5	683,70	7,57	0,00836	
6,0	682,91	8,36	0,00923	
6,5	682,29	8,98	0,00992	
7,0	681,36	9,91	0,01095	
7,5	680,60	10,67	0,01179	
8,0	679,89	11,38	0,01257	
8,5	(678,90)	(12,37)	(0,01366)	Bruch

Bel.-Schw. um + 150 g

Fig. 16.

Tabelle XIV.

Stahldraht (Klavierdraht) Nr. 2.

Durchm. = 0,2 mm; Querschn. = 0,0314 mm²; L_0 = 850 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	L—L_0 in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	(735,67)	—	—	errechnet
0,5	735,19	—		
1,0	734,52	1,15	0,001343	
1,5	733,98	—	—	
2,0	733,37	2,30	0,002686	
2,5	732,81	2,86	0,003345	
3,0	732,21	3,46	0,004047	ohne Bel.-Schw.
3,5	731,65	4,02	0,004701	
4,0	731,04	4,63	0,005415	
4,5	730,47	5,20	0,006081	
5,0	729,86	5,81	0,006795	
5,5	729,28	6,39	0,007473	
6,0	728,62	7,05	0,008245	
6,5	728,00	7,67	0,008970	
6,5	727,69	7,98	0,009333	m. Bel.-Schw. um + 150 g
5,0	729,40	6,27	0,007333	
3,0	731,61		0,004748	Bel.-Schw. um + 150 g
1,0	733,97		0,001988	
0,3	734,88		0,000923	

Fig. 17.

Tabelle XV.

Stahldraht (Klavierdraht) Nr. 2.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz L—L_1 in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
6,0	—	728,62		ohne Bel.-Schw.
6,5	0	728,00	0,62	
„	0^3	727,89	0,73	
„	0^{15}	727,80	0,82	Bel.-Schw. um + 150 g
„	0^{45}	727,75	0,87	
„	1^{45}	727,70	0,92	
„	3^{45}	727,69	0,93	

IV. Teil.

Versuche an Aluminiumdraht.

Die Dehnungskurve eines Aluminiumdrahtes von 0,78 mm Durchmesser bei Anwendung von Belastungsschwankungen um

+ 150 g ist durch Fig. 18 dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle XVI eingetragen. Der Draht riß bei 8,0 kg

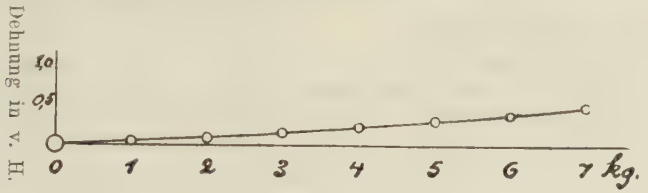

Fig. 18.

unterhalb der oberen Befestigungsstelle. Die der Belastung entsprechende Kathetometerstellung wurde errechnet, indem die Längenänderung von 0 auf 1,0 kg gleichgesetzt wurde derjenigen von 1,0 auf 2,0 kg.

Den zeitlichen Verlauf der Längenänderung dieses Drahtes nach Erhöhen der Belastung von 5,0 auf 6,0 kg geben Fig. 19 und Tabelle XVII wieder.

Der stark ausgezogene Teil der Ordinate gibt denjenigen Teil der Längenänderung wieder, der sofort beim Erhöhen der Belastung von 5,0 auf 6,0 kg und schon vor Beginn der kleinen Belastungsschwankungen eintrat. Die Kurve Fig. 19

Tabelle XVI.

Aluminiumdraht Nr. 1,

Durchm. = 0,78 mm; Querschn. = 0,477 mm²; L_0 = 905 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	(677,74)	—	—	errechnet
1,0	677,31	0,43	0,000474	
1,5	677,09	0,65	0,000707	
2,0	676,88	0,86	0,000950	
2,5	676,66	1,08	0,001193	
3,0	676,38	1,36	0,001502	Bel.-Schw. um + 150 g
3,5	675,98	1,76	0,001944	
4,0	675,60	2,14	0,002364	
5,0	674,81	2,93	0,003237	
6,0	674,00	3,74	0,004132	
7,0	673,11	4,63	0,005116	
8,0	—	—	—	Bruch

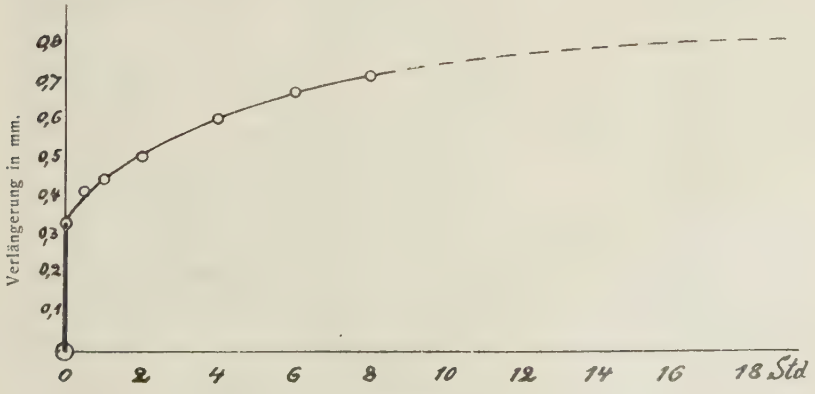

Fig. 19.

weicht insofern von den bisher gefundenen Zeitkurven ab, als sie unter einem Winkel von ungefähr 45° gegen die Ordinate beginnt, während dieser Winkel bisher stets nahezu gleich Null war. Nach achtstündiger Dauer wurden die kleinen Belastungs - Schwankungen um + 150 g unterbrochen. 15 Stunden später war dann noch eine geringe Verlängerung eingetreten, sodaß die Kurve etwa den gestrichelten Verlauf gehabt haben würde.

Figur 20 und Tabelle XVIII sind ebenfalls an einem Aluminiumdraht von 0.78 mm Durchmesser gewonnen. Die Figur lehrt wieder, daß die bei abfallender Belastung auftretenden Verkürzungen der Entlastung proportional sind. Sie treten auch bei Aluminiumdraht sofort im Augenblicke des Entlastens auf. Dann folgende kleine Belastungsschwankungen hatten während 6 Stunden noch keinen Einfluß.

Tabelle XVII.

Aluminiumdraht Nr. 1.

Belastg. in kg.	Zeit in Std. u. Min.	Kath.-Ablesg. in mm	Differenz $L-L_1$ in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5
5	—	674,81		ohne Bel.-Schw.
6	0	674,47	0,34	
„	0^{30}	674,39	0,42	Bel.-Schw. um + 150 g
„	1^{00}	674,36	0,45	
„	2^{00}	674,30	0,51	
„	4^{00}	674,20	0,61	
„	6^{00}	674,19	0,68	
„	8^{00}	674,09	0,72	ohne Bel.-Schw.
„	23^{00}	674,00	0,81	

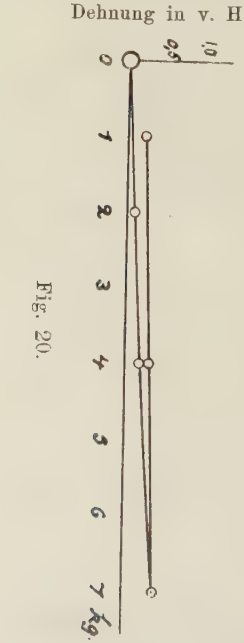

Fig. 20.

Tabelle XVIII.

Aluminiumdraht Nr. 2.

Durchm. = 0,78 mm; Querschn. = 0,477 mm²; L_0 = 790 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	$L-L_0$ in mm	$\frac{L-L_0}{L_0}$	Bemerkg.
1	2	3	4	5
0	(791,11)	—	—	
1,1	790,75	0,36	—	
2,0	790,39	0,72	0,000911	Bel.-Schw. um + 150 g
4,0	789,63	1,48	0,001873	
7,0	787,90	3,21	0,004063	
4,0		2,51	0,003177	
1,0		1,79	0,002265	

II. Abschnitt.

Biegungs-Versuche.

Um zu versuchen, ob sich vielleicht auf andere Weise Versuchsbedingungen, die der Duhem'schen Theorie entsprechen, erziehen lassen, und außerdem auch den Einfluß entgegengesetzter Deformationen untersuchen zu können, wurden weiter Stäbe auf Biegung belastet und in gleicher Weise den kleinen Belastungsschwankungen unterworfen. Die Einrichtung zur Erzeugung der kleinen Belastungsschwankungen war dieselbe wie bei der Untersuchung von Drähten. Die Stäbe lagen beiderseits auf Schneiden auf, die an einem schweren eisernem Bock befestigt waren. Zur Ablesung wurde die Spiegelmethode benutzt. Zu diesem Zwecke wurde an dem einen über die Aufleger-Schneide hinwegragenden Ende des Stabes ein Halter befestigt, der seinerseits in drei Schräubchen den Spiegelträger trug. In größeren Zwischenräumen wurde die Auf- oder Abbewegung der Schneide, an der die Wagschale auf der Mitte des Stabes hing, mittels des Kathetometers gemessen. Aus gleichzeitigen Ablesungen des Kathetometers und der Spiegelskala konnte die Uebersetzung der Spiegelablesung berechnet werden.

Das Hauptgewicht wurde auch bei den Biegungsversuchen darauf gelegt, festzustellen, ob bei gleicher Belastung die Durchbiegung eines Stabes unter den kleinen Belastungsschwankungen dieselbe ist bei ansteigender und bei abfallender Belastung. Zu diesem Zwecke wurden die Versuche in folgender Weise vorgenommen: Es wurde zunächst die Durchbiegung des Stabes bei X kg und unter dem Einfluß der kleinen Belastungsschwankungen bestimmt. Darauf wurde kurze Zeit $^1/_2$ oder 1 Minute die Belastung auf X + a kg erhöht, o h n e daß jedoch die kleinen Belastungsschwankungen zur Anwendung gebracht wurden. Dann wurde wieder auf X kg entlastet und der Endwert der Durchbiegung unter den kleinen Belastungsschwankungen bestimmt.

Als Material wurde wegen seiner großen Homogenität Silberstahl gewählt.

In Tabelle XIX und Fig. 21 ist das Ergebnis einer Versuchsreihe an einem mittelhart gehärteten Stabe von 4 mm Durchmesser wiedergegeben. Die freie Länge zwischen den Auflagerschneiden war 300 mm. Die kleinen Belastungsschwankungen betrugen + 75 g. Bei größeren Belastungsschwankungen wurde das Zittern des Stabes zu störend.

In die Spalte 2 b der Tabelle XIX sind die ansteigenden Belastungen eingetragen, in Spalte 2 c die vorübergehenden, nur

eine Minute währenden ruhigen Belastungen und in Spalte 2a die darauf folgenden absteigenden Belastungen. In Spalte 3 sind die Spiegelablesungen und in Spalte 4 die Differenzen der Spiegelablesungen gegenüber dem der Belastung Null entsprechenden Wert eingetragen. In Spalte 5a, 5b und 5c sind die in mm umgerechneten Differenzen eingetragen. Es gehört Spalte 5a zu Spalte 2a, 5b zu 2b und 5c zu 2c. Die Umrechnung erfolgte aus den in Spalte 6 eingetragenen Kathetometer-Ablesungen 688,00 für 0,5 kg und 668,30 für 9,0 kg und den entsprechenden Werten 31,02 und 78,90 der Spiegelablesung. Es ergiebt sich daraus 78,90 — 31,02 Skalenteile gleich 688,00 — 668,30 Kathetometerteile, oder 1 Spiegelskalenteil = 0,4114. Hiermit multipliziert ergeben die Werte der Spalte 4 die Differenzen der Spalten 5a, 5b und 5c.

Fig. 21.

Die Werte der Spalten 5a, 5b und 5c ergeben bezw. die Kurven a, b, und c der Fig. 21. — Nach der Duhemschen Theorie sollten die entsprechenden Werte der Spalten 5a und 5b gleich sein, oder die Kurven a und b zusammenfallen, was, wie man sieht, nur im Anfang bei schwächeren Belastungen innerhalb der Grenze vollkommener Elastizität der Fall ist.

Von 10 kg Belastung an wurden nur noch Ablesungen mit dem Kathetometer gemacht, da die Ausschläge für die Spiegelablesung zu groß wurden. Bei den Belastungen über 12 kg war der Stab schon so stark durchgebogen, daß er zwischen die Aufleger rutschte.

Da der Stab Nr. 1 auch bei noch stärkerer Durchbiegung mit der Hand nicht brach, und die Kurve bis zum Bruche des Stabes verfolgt werden sollte, so wurde der Stab Nr. 2 so hart wie eben möglich gehärtet.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe an diesem Stabe sind in

Tabelle XIX.

Silberstahl Nr. 1.

Durchmesser = 4 mm; Querschnitt = 12,566 qmm. Länge zwischen den Auflagern = 300 mm.

Nr.	Belastung in kg			Spiegel-Ablesung	Spiegel-Ablesg. Differenz	Differenzen in mm			Kath.-Ablesg. in mm
1	2a	2b	2c	3	4	5a	5b	5c	6
1		0		28,45	—		—		
2		0,5		31,02	2,57		1,057		688,00
3		1,0		33,77	5,32		2,189		
4			2,0	38,89	10,44			4,295	
5	1,0			33,775	5,325	2,190			
6		1,5		36,43	7,98		3,283		
7			2,5	41,51	13,06			5,373	
8	1,5			36,44	7,99	3,287			
9		2,0		39,10	10,65		4,381		
10			3,0	44,12	15,67			6,447	
11	2,0			39,14	10,69	4,398			
12		2,5		41,79	13,34		5,488		
13			3,5	46,79	18,34			7,545	
14	2,5			41,83	13,38	5,505			
15		3,0		44,68	16,23		6,677		
16			4,0	49,48	21,03			8,652	
17	3,0			44,98	16,53	6,800			
18		4,0		50,00	21,55		8,866		
19			5,0	54,84	26,39			10,857	
20	4,0			50,21	21,76	8,952			
21		5,0		55,32	26,87		11,054		
22			6,0	59,79	31,34			12,893	
23	5,0			55,88	27,43	11,285			
24		6,0		61,13	32,68		13,445		
25			7,0	65,30	36,85			15,160	
26	6,0			62,06	33,61	13,827			
27		7,0		66,50	38,05		15,654		
28			8,0	70,61	42,16			17,345	
29	7,0			69,04	40,59	16,699			
30		8,0		71,90	43,45		17,875		
31			9,0	76,60	48,15			19,809	
32	8,0			75,45	47,00	19,336			
33		9,0		78,90	50,45		20,755		668,30
34			10,0	85,72	57,27			23,560	
35	9,0			85,03	56,58	23,277			
36		10,0		—	—		25,395		663,66
37			11,0	—	—			29,155	659,95
38	10,0			—	—	28,875			660,18
39		11,0		—	—		30,685		658,37
40			12,0	—	—			34,845	654,21
41	11,0			—	—	34,655			654,40

Tabelle XX und Fig. 22 eingetragen. Der Stab Nr. 2 war dünner als Stab Nr. 1, er hatte einen Durchmesser von 3,5 mm. Sodann blieb die ausschließlich ruhende Belastung der Spalte 2c der Tabelle XX nur $^1/_2$ Minute einwirkend, während sie beim Stab Nr. 1 1 Minute einwirkte. Die Werte der Spalten 5a, 5b,

und 5c der Tabelle XX sind wieder bezw. in die Kurven a, b und c der Fig. 22 eingetragen. Der Stab brach bei der ansteigenden Belastung von 4,5 kg, nachdem er die kleinen Belastungsschwankungen um + 75 g 3 Minuten ausgehalten hatte.

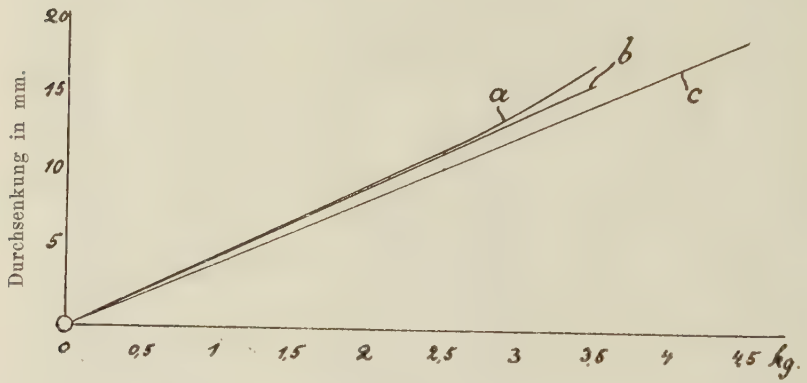

Fig. 22.

Die Kurven a der Fig. 21 und 22 sind diejenigen für die absteigende Belastung. Nach der Duhem'schen Theorie müßten sie mit den Kurven b für ansteigende Belastung zusammenfallen. Wir sehen aber, daß dies nicht zutrifft, vielmehr entfernen sich die Kurven umsomehr voneinander, je höher die Belastung ansteigt.

Tabelle XX.

Silberstahl Nr. 2.

Durchmesser = 3,5 mm; Querschnitt = 9,62 qmm. Länge zwischen den Auflagern = 300 mm.

Nr.	Belastung in kg			Spiegel-Ablesung	Spiegel-Ablesg. Differenz	Differenzen in mm			Kath.-Ablesg. in mm
1	2a	2b	2c	3	4	5a	5b	5c	6
1		0		11,00	—		—		684,00
2		0,5		16,93	5,93		2,224		
3			1,5	27,35	16,35			6,131	
4	0,5			17,05	6,05	2,269			
5		1,5		29,49	18,49		6,934		
6			2,5	39,18	28,18			10,568	
7	1,5			29,73	18,73	7,024			
8		2,5		41,88	30,88		11,590		
9			3,5	49,98	38,98			14,618	
10	2,5			42,41	31,41	11,779			
11		3,5		54,10	43,10		16,063		670,10
12			4,5	62,60	51,60			19,350	
	3,5			57,18	46,18	17,518			
		4,5							

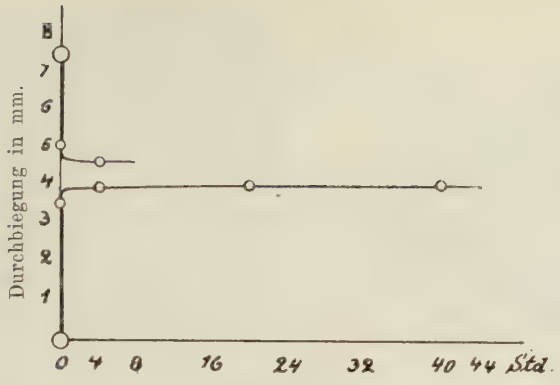

Fig. 23.

Den zeitlichen Verlauf der Abwärts- bezw. Aufwärtsbewegung der Stabmitte bei einer Belastung bezw. Entlastung veranschaulichen die Tabellen XXI u. XXII u. Fig. 23, und zwar geben Tabelle XXI und die untere Kurve der Fig. 23 den zeitlichen Verlauf der Durchsenkung der Stabmitte nach Aenderung der Belastung von 1,5 auf 2,5 kg und unter den kleinen Belastungsschwankungen um + 75 g wieder. Tabelle XXII und die obere Kurve der Fig. 23 dagegen geben den zeitlichen Verlauf der Aufwärtsbewegung der Stabmitte wieder, nachdem eine halbe Minute mit 3,5 kg belastet und dann wieder auf 2,5 kg entlastet worden war. Sowohl bei der oberen wie bei der unteren Kurve bedeutet der stark gezeichnete Teil der Ordinate diejenige Aufwärts- bezw. Abwärtsbewegung der Stabmitte, welche sofort im Augenblicke des Entlastens bezw. Belastens eintrat, schon vor dem Einsetzen der kleinen Belastungsschwankungen. Dieser sofort ohne die kleinen Belastungsschwankungen eintretende Teil

Tabelle XXI.
Silberstahl Nr. 2.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Spiegel-Ablesg.	Differenz	Differenz in mm
1	2	3	4	5
1,5		29,73	—	—
2,5	0	39,38	9,65	3,619
„	0^{5}	40,00	10,27	3,851
„	0^{15}	40,08	10,35	3,881
„	0^{30}	40,18	10,45	3,919
„	1^{00}	40,26	10,53	3,949
„	2^{00}	40,49	10,76	4,035
„	3^{00}	40,55	10,82	4,058
„	4^{00}	40,58	10,85	4,069
„	20^{00}	41,52	11,79	4,421
„	23^{00}	„	„	„
„	40^{00}	41,88	12,15	4,556
„	45^{00}	41,88	12,15	45,56

Tabelle XXII.
Silberstahl Nr. 2.

Belastg. in kg	Zeit in Std. u. Min.	Spiegel-Ablesg.	Differenz	Differenz in mm
1	2	3	4	5
3,5	—	49,98	20,25	7,594
2,5	0	43,54	13,81	5,179
„	1^{00}	42,48	12,75	4,781
„	4^{00}	42,41	12,68	4,755
„	8^{00}	42,41	12,68	47,55
„				

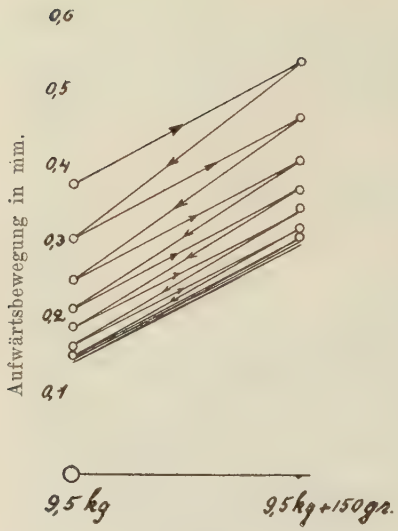

Fig. 24.

Belastung dagegen nur von einigen Stunden erforderlich war. Zur Bestimmung eines jeden Punktes der Kurven II der Fig. 21 und 22 war demgemäß eine Versuchsdauer von mindestens 2 Tagen erforderlich.

Die beiden Kurven sind in die Fig. 23 so eingetragen, daß sie sich nach der Duhemschen Theorie berühren müßten. Zu diesem Zweck sind auch die Differenzen der Tabelle XXII von dem Endwert der Spiegelablesung bei 1,5 kg gemessen.

In den Tabellen XXIII und XXIV und den Fig. 24 und 25 kommt der Einfluß der einzelnen Belastungsschwankungen zum Ausdruck. Die Versuche sind gemacht an einem Eisenstab von 12 × 6 mm, der zwischen den Auflagerschneiden eine Länge von 1000 mm hatte und flachkantig lag.

In Tabelle XXIII und Fig. 24 ist der Fortgang der Aufwärts- bezw. Abwärtsbewegung der Stabmitte weitaus beträchtlicher als der unter dem Einflusse der kleinen Belastungsschwankungen auftretende. Die Fig. 23 lehrt weiterhin noch, daß um die Durchbiegung des Stabes unter dem Einflusse der kleinen Belastungs-Schwankungen konstant zu bekommen, bei ansteigender Belastung eine Zeit von mehreren Tagen, bei abfallender

Tabelle XXIII.

Eisenstab 12 × 6 mm; flachliegend.
Länge zwischen den Auflegern = 1000 mm.

Spiegel-Ablesung bei 9,5 kg	Spiegel-Ablesung bei 9,5 kg + 150 g	Spiegel-Ablesg. — 59,70	Differenzen in mm	
1a	1b	2	3a	3b
60,43		0,73	0,385	
	60,74	1,04		0,548
60,29		0,59	0,311	
	60,60	0,90		0,474
60,19		0,49	0,258	
	60,49	0,79		0,416
60,11		0,41	0,218	
	60,42	0,72		0,379
60,07		0,37	0,195	
	60,37	0,67		0,353
60,02		0,32	0,169	
	60,32	0,62		0,327
60,00		0,30	0,158	
	60,30	0,60		0,316
59,99		0,29	0,153	
	60,29	0,59		0,311
59,98		0,28	0,148	
	60,28	0,58		0,306
59,97		0,27	0,142	
	60,27	0,57		0,300
59,96		0,26	0,137	
	60,26	0,56		0,295
59,95		0,25	0,132	
	60,24	0,54		0,285
59,93		0,23	0,121	
	60,22	0,52		0,274
59,93		0,23	0,121	
	60,21	0,51		0,269
59,92		0,22	0,116	
	60,21	0,51		0,269
59,92		0,22	„	
	„	0,51		„
„		0,22	„	

Aufwärtsbewegung der Stabmitte unter den Belastungsschwankungen um + 150 g dargestellt. Die absteigende Belastung betrug 9,5 kg. Der Endwert der ansteigenden Belastung von 9,5 kg war vorher mit 59,70 gefunden worden. Danach war der Stab 2 Minuten lang ohne kleine Belastungsschwankungen mit 11,5 kg belastet gewesen. In die Spalte 1a der Tabelle XXIII sind die Spiegelablesungen bei 9,5 kg, in Spalte 1b diejenigen bei 9,5 kg + 150 g eingetragen. In die Spalte 2 ist die Differenz zwischen den Spiegelablesungen und dem vorher gefundenen Werte von 59,70 — Endwert der ansteigenden Belastung von 9,5 kg — eingetragen. In die Spalten 3a und 3b sind die in Millimeter umgerechneten Differenzen eingetragen. Der Umrechnungsfaktor ist 0,527.

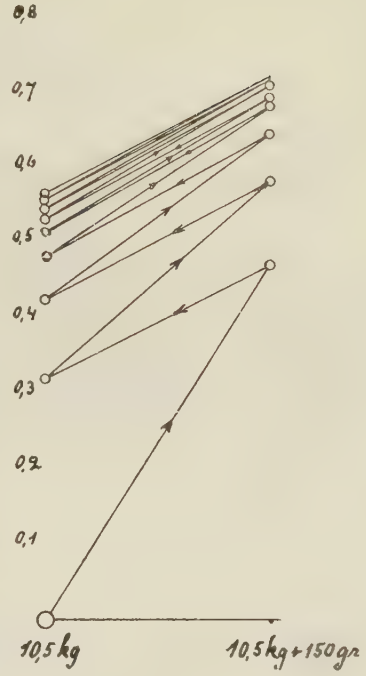

Fig. 25.

Tabelle XXIV.

Eisenstab 12 × 6 mm; flachliegend.

Spiegel-Ablesung bei 10,5 kg	Spiegel-Ablesung bei 10,5 kg + 150 g	Differenzen	Differenzen in mm	
1a	1b	2	3a	3b
61,20		0	0	
	62,10	0,90		0,474
61,81		0,61	0,321	
	62,31	1,11		0,585
62,01		0,81	0,427	
	62,43	1,23		0,648
62,12		0,92	0,485	
	62,50	1,30		0,685
62,18		0,98	0,516	
	62,52	1,32		0,696
62,21		1,01	0,532	
	62,55	1,35		0,711
62,24		1,04	0,548	
	62,56	1,36		0,717
62,26		1,06	0,559	
	62,57	1,37		0,722
62,28		1,08	0,569	
	62,57	1,37		0,722
62,28		1,08	0,569	
	62,57	1,37		0,722
62.29		1,09	0,574	
	62,57	1,37		0,722
62,29		1,09	0,574	
	62,55	1,35		0,711
62,29		1,09	„	
	„	1,35		„
„		1,09	„	
	„	1,35		„
„		1,09	„	

Für die auf die absteigende Belastung 9,5 kg folgende ansteigende Belastung 10,5 kg ist der Einfluß der kleinen Belastungsschwankungen aus Tabelle XXIV und Fig. 25 ersichtlich.

Die Fig. 24 und 25 veranschaulichen in anderer Form dasselbe wie alle bisher gefundenen Zeitkurven, daß nämlich die Verlängerung u. Verkürzung bzw. die Abwärts- u. Aufwärtsbewegung am raschesten erfolgen unmittelbar nach Einsetzen der kleinen Belastungsschwankungen.

III. Abschnitt.

Wiederholte Durchbiegung eines Stabes nach entgegengesetzten Seiten.

Die kleinen Belastungsschwankungen könnten den ihnen nach der Duhem'schen Theorie zukommenden Einfluß besonders in folgendem Fall ausüben, der deshalb einer genaueren Untersuchung wert schien. Ein homogener Stab wird ansteigend belastet und den Belastungsschwankungen unterworfen. Nach Ansteigen der Belastung bis zu einem gewissen positiven Maximal-

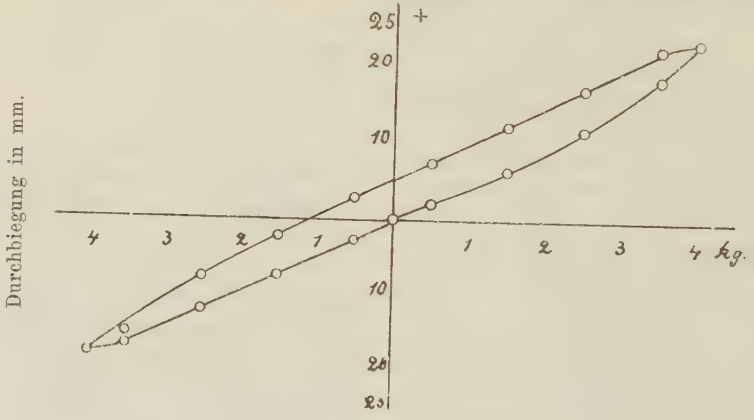

Fig. 26.

wert wird der Stab wieder stufenweise und unter Andauern der Belastungsschwankungen entlastet. Nach völliger Entlastung wird der Stab umgedreht, stufenweise bis zu dem gleichen Maximalwert belastet und dem Einflusse der Belastungsschwankungen ausgesetzt, hierauf wieder entlastet, dann wieder in die erste Lage umgedreht usw.[1])

Der Versuch wurde durchgeführt an einem Stab aus naturhartem Silberstahl von 3,5 mm Durchmesser und 300 mm Länge zwischen den Auflageschneiden.

Die Belastungsschwankungen betrugen hier nur 75 g, da bei stärkeren Schwankungen störende Vibrationen des Stabes auftraten. In der Mitte des Stabes war senkrecht zu seiner Längsachse eine Nadelspitze festgeklebt, auf deren äußerste Spitze mit dem Kathetometerfernrohr visiert wurde.

[1]) Ähnliche Beobachtungen hat mit einer kleinen Zahl von Belastungsschwankungen M. Cantone (a. a. O.) ausgeführt.

Tabelle XXV.

Stab aus Silberstahl.

Durchmesser = 3,5 mm; freie Länge = 300 mm.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	Kath.-Ablesung bezogen auf Stabaxe	Durchbiegung in mm	Bemerkg.	Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	Kath.-Ablesung bezogen auf Stabaxe	Durchbiegung in mm	Bemerkg.
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	472,00	463,15	0,0	Stablage I ohne Belastungsschwankungen	0	459,55	468,40	5,25	Stablage II ohne Belastungsschwankungen
0,5	469,90	461,05	2,10		0,5	457,20	466,05	2,90	
1,0	467,80	458,95	4,20		1,0	454,70	463,55	0,40	
1,5	465,50	456,65	6,50		1,5	452,10	460,95	— 2,20	
2,0	462,90	454,05	9,10		2,0	449,35	458,20	— 4,95	
2,5	460,05	451,20	11,95		2,5	446,45	455,30	— 7,85	
3,0	456,75	447,90	15,25		3,0	443,30	452,15	— 11,00	
3,5	453,15	444,30	18,85		3,5	440,05	448,90	— 15,25	
4,0	448,45	439,60	23,55		4,0	436,30	445,15	— 18,00	
3,5	449,40	440,55	22,60		3,5	437,40	446,25	— 16,90	
2,5	454,70	445,85	17,30		2,5	442,30	451,15	— 12,00	
1,5	459,50	450,65	12,50		1,5	446,85	455,70	— 7,45	
0,5	464,30	455,45	7,70		0,5	451,55	460,40	— 2,75	
0	466,65	457,85	5,30		0	453,80	462,65	— 0,50	

Um die Elastizität des Stabes zu erhöhen, wurde derselbe zunächst ohne Belastungsschwankungen ansteigend bis zu 4 kg belastet, auf Null entlastet, dann umgedreht, wieder bis auf 4 kg belastet und auf Null entlastet. Nach Vollendung dieses Cyklus,

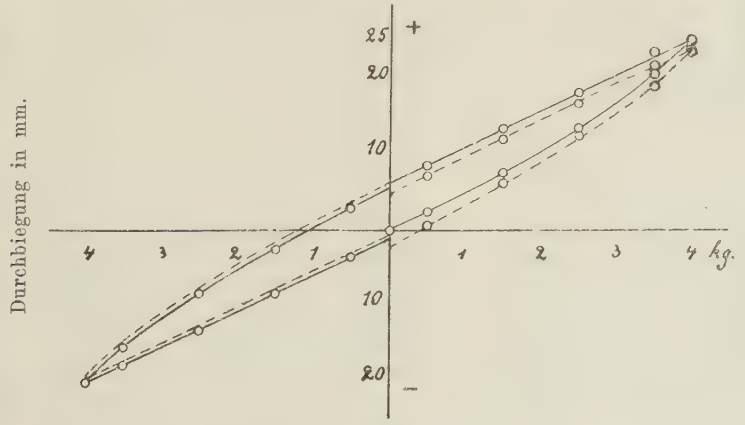

Fig. 27.

dessen Ergebnisse in Tabelle XXV und Fig. 26 eingetragen sind, war der Ausgangswert mit genügender Annäherung wieder erreicht, sodaß mit den Belastungsschwankungen begonnen werden konnte.

Die Ergebnisse zweier Cyklen mit Belastungsschwankungen sind in Tabelle XXVI und XXVII eingetragen. In die Tabelle sind auch noch die Werte für einen dritten Cyklus eingetragen. Derselbe fällt schon fast vollständig mit dem zweiten zusammen, wie aus Spalte 5 des 3. Cyklus hervorgeht, welche die Differenzen

gegenüber dem 2. Cyklus wiedergibt. Es wird also auch hier die Duhem'sche Theorie nicht bestätigt. In Fig. 27 gibt die ausgezogene Kurve die Werte des ersten Cyklus, die punktierte diejenigen des zweiten Cyklus wieder.

Es sei hier noch erwähnt, daß vor jeder Ablesung eines der in Tabelle 26 eingetragenen Werte mindestens ein Tag, bei den höheren Belastungen zwischen 2 und 4 kg mindestens 2 Tage die kleinen Belastungsschwankungen um 75 g einwirkten, sodaß zur Erzielung der ganzen Tabelle XXVI eine Zeit von über 1 Monat erforderlich war.

Tabelle XXVI.

Stab aus Silberstahl.

Durchmesser = 3,5 mm; freie Länge = 300 mm. Belastungsschwankungen = 75 g.

Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	Kath.-Ablesung bezogen auf Stabaxe.	Durchbiegung in mm	Differenzen	Bemerkg.	Belastg. in kg	Kath.-Ablesg. in mm	Kath.-Ablesung bezogen auf Stabaxe	Durchbiegung in mm	Differenzen	Bemerkg.
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
						1. Cyklus.					
0	472,40	463,55	0		Stablage 1.	0	460,50	469,35	5,80		Stablage 2.
0,5	469,90	461,05	2,50			0,5	457,75	466,50	2,95		
1,5	464,70	455,85	7,70			1,5	452,20	461,05	— 2,50		
2,5	458,80	449,95	13,60			2,5	446,40	455,25	— 8,30		
3,5	451,65	442,80	20,75			3,5	439,30	448,15	— 15,40		
4,0	447,25	438,40	25,15			4,0	434,60	443,45	— 20,10		
3,5	448,67	439,82	23,73			3,5	436,75	445,60	— 17,95		
2,5	454,15	445,30	18,25			2,5	441,50	450,35	— 13,20		
1,5	458,95	450,10	13,45			1,5	446,25	455,10	— 8,40		
0,5	463,70	454,85	8,70			0,5	451,00	459,85	— 3,65		
0	466,20	457,35	6,20			0	453,35	462,20	— 1,35		
						2. Cyklus.					
0	474,75	465,90	— 2,35		Stablage 1.	0	460,95	469,80	6,25		Stablage 2.
0,5	471,75	462,90	0,65			0,5	458,10	466,95	3,40		
1,5	466,35	457,50	6,05			1,5	452,55	461,40	— 2,15		
2,5	460,10	451,25	12,30			2,5	446,80	455,65	— 7,90		
3,5	453,20	444,35	19,20			3,5	439,60	448,45	— 15,10		
4,0	448,70	439,85	23,70			4,0	435,30	444,15	— 19,40		
3,5	450,45	441,60	21,95			3,5	437,50	446,35	— 17,20		
2,5	455,60	446,75	16,80			2,5	442,30	451,15	— 12,40		
1,5	460,45	451,60	11,95			1,5	446,90	455,75	— 7,85		
0,5	465,30	456,45	7,10			0,5	451,70	460,55	— 3,00		
0	467,75	458,90	4,65			0	454,05	462,90	— 0,65		
						3. Cyklus.					
0	474,85	466,00	— 2,45	— 0,10	Stablage 1.	0	461,05	469,90	6,35	— 0,10	Stablage 2.
0,5	472,10	463,25	0,30	— 0,35		0,5	458,25	467,10	3,55	— 0,15	
1,5	466,60	457,75	5,80	— 0,25		1,5	452,75	461,60	— 1,95	— 0,20	
2,5	460,35	451,50	12,05	— 0,25		2,5	446,90	455,75	— 7,80	— 0,10	
3,5	453,45	444,60	18,95	— 0,25		3,5	440,05	448,90	— 14,65	— 0,45	
4,0	448,95	440,10	23,45	— 0,25		4,0	435,20	444,05	— 19,50	— 0,10	
3,5	451,15	442,30	21,25	— 0,70		3,5	437,40	446,25	— 17,30	— 0,10	
2,5	456,00	447,15	16,40	— 0,40		2,5	442,15	451,00	— 12,55	— 0,15	
1,5	460,80	451,95	11,60	— 0,35		1,5	447,05	455,90	— 7,65	— 0,15	
0,5	465,65	456,80	6,75	— 0,35		0,5	451,75	460,60	— 2,95	— 0,05	
0	468,10	459,25	4,30	— 0,25		0	454,15	463,00	— 0,55	— 0,10	

Ergebnis.

Das Ergebnis war, was die Duhem'sche Elastizitätstheorie anbelangt, ein negatives. Nur bei den Biegungsversuchen und innerhalb der Elastizitätsgrenze wurde ein der Duhem'schen Theorie annähernd entsprechendes Verhalten der Materialien beobachtet. Die Duhem'sche Theorie soll aber auch für Belastungen oberhalb der Elastizitätsgrenze gelten.

Die unter dem Einfluß der periodischen Belastungsschwankungen gewonnenen Dehnungs- und Zeitkurven sind ihrem Charakter nach den ohne Belastungsschwankungen erhaltenen gleich, sie unterscheiden sich nur mit Bezug auf die absoluten Werte.

Bei Belastung auf Zug tritt während einer Unterbrechung der periodischen Belastungsschwankungen eine merkbare Längenänderung nicht ein. Beim Wiedereinsetzen der Belastungsschwankungen erfolgt sofort eine verhältnismäßig starke Ausdehnung. Es scheinen also während der Ruhepausen latente Aenderungen des Materials einzutreten. Diese Erscheinung wurde nach jeder neuen Ruhepause von neuem bemerkt, sodaß ein Endwert der Verlängerung auch nach wochenlangen Belastungsschwankungen nicht gewonnen wurde.

Bei Entlastung eines Drahtes, der vorher den kleinen Belastungsschwankungen ausgesetzt gewesen war, erfolgte sofort im Augenblicke der Entlastung eine geringe Verkürzung, welche der Größe der Belastung proportional ist. Ein Einfluß von auf die Entlastung folgenden Belastungsschwankungen auf die Drahtlänge wurde nicht beobachtet. Es scheint daher, daß die Belastungsschwankungen das Material zu einem bis zur Bruchgrenze nahezu vollkommen elastischen machen, oder daß die Elastizitätsgrenze bis zur Bruchgrenze ausgedehnt wird.

Die vorhergehende Einwirkung von Belastungsschwankungen von einer gewissen Amplitude macht nachfolgende Belastungsschwankungen von kleinerer Amplitude fast unwirksam. Es ist dadurch ein Mittel geboten, den Einfluß von Belastungsschwankungen, die eine gewisse Größe nicht überschreiten, zu unterdrücken, in ähnlicher Weise, wie man den Einfluß von Temperaturschwankungen auf den permanenten Magnetismus eines Magneten verhindern kann.

Bei Durchbiegung eines Stabes entfernen sich die für ansteigende und für abfallende Belastung gefundenen Durchbiegungskurven mit wachsender Belastung immer mehr von einander.

Belastet man einen Stab unter Belastungsschwankungen allmählich bis zu einem Maximalwert, entlastet ihn darauf unter Belastungsschwankungen allmählich auf Null, dreht ihn darauf um, belastet und entlastet wieder und vollführt so mehrere Cyklen unter dem Einfluß der Belastungsschwankungen, so erhält man schon nach wenigen Cyklen eine konstante Kurve nach Art der Hysteresiskurve.

Vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Wilhelms-Universität zu Münster in Westf. und darauf der Landes-Universität Rostock in Meckl. angefertigt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Heydweiller für die Anregung der verliegenden Arbeit und seine freundlichst gewährte Unterstützung meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Geboren bin ich zu Emsbüren im Regierungsbezirk Osnabrück am 13. Dezember 1874.

Das Zeugnis der Reife erlangte ich am Gymnasium zu Emden. Nachdem ich dann ein Jahr in den Werkstätten des Eisen- und Stahlwerkes zu Osnabrück gearbeitet hatte, besuchte ich 8 Semester die Königliche Technische Hochschule zu Berlin-Charlottenburg.

Vom Jahre 1902—1907 war ich als Ingenieur bei Maschinenfabriken und darauf bei Patentanwälten angestellt. Im Jahre 1907 und 1908 nahm ich im physikalischen Institut der Wilhelms-Universität Münster in Westf. und darauf der Landes-Universität Rostock in Meckl. diejenigen Versuche vor, deren Ergebnis die vorliegende Arbeit ist.